



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ESTIMASI FLUKS SISA PADA TRANSFORMATOR 1-FASA
MENGUNAKAN PEMODELAN DINAMIS
TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN**

Ayyub Dhimastara Aji
NRP 2213 100 164

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**ESTIMATION OF RESIDUAL FLUX IN 1-PHASE
TRANSFORMER USING DYNAMIC MODELING OF TWO
WINDING 1-PHASE TRANSFORMER**

Ayyub Dhimastara Aji
NRP 2213 100 164

Advisors

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Estimasi Fluks Sisa pada Transformator 1-Fasa Menggunakan Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan”** adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 30 Juli 2017

Ayyub Dhimastara Aji
NRP. 2213100164

ESTIMASI FLUKS SISA PADA TRANSFORMATOR 1-FASA MENGGUNAKAN PEMODELAN DINAMIS TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002

**SURABAYA
JULI, 2017**

ESTIMASI FLUKS SISA PADA TRANSFORMATOR 1-FASA MENGGUNAKAN PEMODELAN DINAMIS TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyutujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Dosen Pembimbing II



Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



ESTIMASI FLUKS SISA PADA TRANSFORMATOR 1-FASA MENGGUNAKAN PEMODELAN DINAMIS TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN

Nama : Ayyub Dhimastara Aji
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Pada studi ini dilakukan estimasi fluks sisa pada transformator 1-fasa 1 kVA dengan perbedaan model pemotongan inti transformator. Metode yang digunakan adalah pemodelan transformator 1-fasa dua belitan menggunakan *simulink* pada perangkat lunak MATLAB. Fluks sisa dapat diestimasi menggunakan hasil dari arus *inrush* yang didapat saat simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB dan saat eksperimen pengukuran arus *inrush* secara langsung dengan meng-*energize* transformator. Setelah terlihat hasil arus *inrush* dari simulasi dan eksperimen langsung, maka akan didapatkan perbedaan arus *inrush* hasil simulasi dan eksperimen. Perbedaan tersebut digunakan untuk mengestimasi fluks sisa pada transformator 1-fasa.

Hasil yang didapatkan pada eksperimen langsung dan simulasi adalah besar nilai arus *inrush* pada transformator E-I saat simulasi sebesar 5 A sedangkan saat eksperimen langsung nilainya 22 A ketika transformator tidak didemagnetisasi sama sekali dan memiliki nilai fluks sisa sebesar 890 Wb. Untuk transformator E/E nilai arus *inrush* saat simulasi sebesar 4,4 A sedangkan saat eksperimen langsung nilainya 9,7 A ketika transformator tidak didemagnetisasi sama sekali dan memiliki nilai fluks sisa sebesar 300 Wb. Estimasi nilai fluks sisa pada transformator E-I lebih besar dari pada transformator E/E pada kondisi waktu demagnetisasi yang sama. Nilai arus *inrush* transformator E-I juga lebih besar dari transformator E/E dipengaruhi oleh pemodelan inti.

Kata Kunci: Arus *Inrush*, Transformator Satu Fasa, Fluks Sisa, Pemodelan Transformator dengan *simulink*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ESTIMATION OF RESIDUAL FLUX IN 1-PHASE TRANSFORMER USING DYNAMIC MODELING OF TWO WINDING 1-PHASE TRANSFORMER

Name : Ayyub Dhimastara Aji
1st Advisor : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

This study deals with the estimation of residual flux in 1 kVA single phase transformer with core cutting model differences. The used method is two winding single phase transformer simulated with Simulink in MATLAB software. Residual flux can be estimated with inrush current in MATLAB software simulation result and with directly experiment inrush current measurement at energizing transformer. Having seen the result of inrush current from simulation and experiment, the result shown a difference between the simulated inrush current result and experimental result, These differences are used to estimate residual flux from 1-phase transformers.

The result obtained from experiment and simulation is inrush current value from E-I transformer when simulation as much as 5 A but from the experiment as much as 22 A when demagnetization from transformer not performed and has residual flux as much as 890 Wb. And inrush current value from E/E transformer when simulation as much as 4,4 A but from the experiment as much as 9,7 A when demagnetization from transformer not performed and has residual flux as much as 300 Wb. Residual flux estimation from E-I transformer bigger than E/E transformer at the same time demagnetization. The inrush current value from E-I transformer bigger than E/E transformer. The result shows that different core cutting topology affects the residual flux as well as the time of demagnetization.

Key Words: Inrush Current, Single Phase Transformer, Residual Flux, Modelling of Transformer with Simulink.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta nikmatnya yang selalu terlimpahkan kepada penulis. Shalawat serta salam tidak lupa penulis curahkan kepada utusan Allah SWT, uswatun hasanah bagi seluruh umat manusia, Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir “Estimasi Fluks Sisa pada Transformator 1-Fasa Menggunakan Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan” ini dengan baik dan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc. dan Bapak Daniar Fahmi, ST., MT. atas segala pengetahuan dan waktunya dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini dengan baik.
2. Kedua orang tua penulis yang selalu ingin penulis banggakan, Papa Suharmaji dan Mama Ambar Hernawati yang tiada henti memberikan nasihat, semangat, motivasi, do’a, dan dukungan materil kepada penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Kakak Adam, Adik Alma, Atung, Uti, Mbah Kakung, Mbah Putri dan seluruh keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir.
4. Bapak Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D., Mas Arief Budi Ksatria, Mas Wahyudi, Mas Yudha, Mas Aal, dan aisten laboratorium Konversi Energi yang mau membantu dan memberikan solusi dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen, staff, dan karyawan Departemen Teknik Elektro FTE-ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Muhamad, Irfan, dan Akbar, selaku tim transformator yang selalu mendukung penulis dengan berbagi ilmu dalam menyelesaikan tugas akhir.

7. Keluarga angkatan 2013 (e53) yang membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
8. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yaitu Jo, Azmi, Dio, Maulana, Krishanti, Anisa, Della, Usop, Hadi, Lutfi, Reno, Adit, Adit, Ikhlas, Neisyah, dan Dhanang yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis dapat wisuda ke-116.
9. Sahabat dari jenjang mahasiswa baru ECLUS yang selalu menjadi tempat untuk direpotkan selama penulis berkuliah.
10. Anindya Cipta, Dzakia Amalia Karima, dan Muhammad Farisi sahabat yang selalu mendukung dan memotivasi untuk dapat lulus bersama.
11. Dan terima kasih banyak yang terakhir dan tidak terhitung untuk Yeni Wahyu Siswanti yang selalu mendampingi, mendukung, memotivasi, dan membantu penulis dalam menyelesaikan seluruh rangkaian tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	3
 BAB 2 TRANSFORMATOR	 5
2.1 Pengertian Transformator	5
2.2 Jenis dan Kontruksi pada Transformator	6
2.3 Transformator Ideal	7
2.4 Transformator Tidak Ideal	9
2.4.1 Rangkaian Ekivalen Transformator Tidak Ideal	10
2.4.2 Parameter Rangkaian Ekivalen Transformator	12
2.5 Arus <i>Inrush</i> pada Transformator	15
2.6 Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Menggunakan <i>SIMULINK</i>	18
 BAB 3 PEMODELAN TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN DAN EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS INRUSH PADA TRANSFORMATOR	 21
3.1 Spesifikasi Transformator Uji	21
3.1.1 Spesifikasi Transformator E-I	22
3.1.2 Spesifikasi Transformator E/E	23
3.2 Simulasi Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan	24
3.2.1 Pengujian Parameter pada Transformator	25

3.2.1.1	Pengujian Hubung Singkat (<i>Short Circuit Test</i>)	25
3.2.1.2	Pengujian Tanpa Beban (<i>Open Circuit Test</i>)	27
3.2.1.3	Pengujian Sumber DC (<i>DC Test</i>)	36
3.2.2	Kurva Parameter Transformator	39
3.2.2.1	Kurva Instantaneous Fluks vs Arus Magnetisasi	45
3.2.2.2	Kurva Instantaneous Delta Fluks ($\Delta\psi$) vs Fluks Saturasi (ψ_{sat})	50
3.2.3	Simulasi <i>SIMULINK</i> pada Perangkat Lunak MATLAB	54
3.3	Eksperimen Pengukuran Arus <i>Inrush</i>	55
3.3.1	Alat Yang Digunakan Untuk Pengukuran.	56
3.3.1.1	Sumber 1-Fasa	57
3.3.1.2	Komponen Pensaklaran	58
3.3.1.3	Transformator Arus	58
3.3.1.4	Perangkat Keras Akuisisi Data dan Perangkat Lunak LabVIEW	59
3.3.2	Proses Demagnetisasi	60
BAB 4 HASIL PENGUJIAN ARUS <i>INRUSH</i> DAN ANALISIS ESTIMASI FLUKS SISA		63
4.1	Eksperimen Arus <i>Inrush</i>	63
4.1.1	Hasil Eksperimen Arus <i>Inrush</i> Transformator E-I	63
4.1.2	Hasil Eksperimen Arus <i>Inrush</i> Transformator E/E	65
4.2	Analisis Simulasi Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan	68
4.3	Estimasi Fluks Sisa pada Transformator	69
BAB 5 PENUTUP		75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
RIWAYAT HIDUP		79

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Transformator tipe inti (<i>core-form</i>)	6
Gambar 2.2 Transformator tipe cangkang (<i>shell-form</i>) kumparan tidak saling menumpuk	6
Gambar 2.3 Transformator tipe cangkang (<i>shell-form</i>) kumparan saling menumpuk	7
Gambar 2.4 Transformator ideal tidak berbeban	8
Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen dari transformator 1-fasa	10
Gambar 2.6 Skema pengujian transformator hubung singkat	12
Gambar 2.7 Skema pengujian transformator tanpa beban	13
Gambar 2.8 Skema pengujian transformator sumber tegangan DC	14
Gambar 2.9 Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks	16
Gambar 2.10 Diagram persamaan pada pemodelan transformator 1 fasa dua belitan	19
Gambar 3.1 Topologi inti pada transformator satu fasa E-I	22
Gambar 3.2 Bentuk transformator satu fasa E-I	22
Gambar 3.3 Topologi inti pada transformator satu fasa E/E	23
Gambar 3.4 Bentuk transformator satu fasa E/E	23
Gambar 3.5 Skema simulasi arus <i>inrush</i>	24
Gambar 3.6 Blok diagram menentukan kurva pada transformator	41
Gambar 3.7 Kurva error rms pada transformator E-I	42
Gambar 3.8 Kurva error rms pada transformator E/E	42
Gambar 3.9 Kurva error instantaneous pada transformator E-I	43
Gambar 3.10 Kurva error instantaneous pada transformator E/E	43
Gambar 3.11 Kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi pada transformator E-I	49
Gambar 3.12 Kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi pada transformator E/E	49
Gambar 3.13 Kurva instantaneous delta fluks vs fluks saturasi pada transformator E-I	53

	Hal
Gambar 3.14	Kurva instantaneous delta fluks vs fluks saturasi pada transformator E/E
Gambar 3.15	Blok diagram pemodelan transformator 1-fasa dua belitan dengan simulink
Gambar 3.16	Skema eksperimen arus <i>inrush</i>
Gambar 3.17	Rangkaian pengukuran arus <i>inrush</i> dan demagnetisasi transformator 1-fasa
Gambar 3.18	Panel sumber tiga fasa tampak luar (a), tampak dalam (b)
Gambar 3.19	Rangkain pensaklaran
Gambar 3.20	Peralatan transformator arus
Gambar 3.21	Bagian dalam DAQ 9246
Gambar 3.22	DAQ 9246 sisi depan (a), DAQ 9246 sisi belakang (b)
Gambar 3.23	Kapasitor demagnetisasi
Gambar 4.1	Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 0 menit
Gambar 4.2	Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 9 menit
Gambar 4.3	Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 120 menit
Gambar 4.4	Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 0 menit
Gambar 4.5	Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 9 menit
Gambar 4.6	Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 120 menit
Gambar 4.7	Bentuk gelombang arus hasil simulasi pada transformator E-I
Gambar 4.8	Bentuk gelombang arus hasil simulasi pada transformator E/E
Gambar 4.9	Perbandingan bentuk gelombang eksperimen transformator E-I
Gambar 4.10	Perbandingan bentuk gelombang eksperimen transformator E/E
Gambar 4.11	Kurva hubungan antara waktu demagnetisasi dengan fluks sisa pada kedua transformator

		Hal
Gambar 4.12	Perbandingan bentuk gelombang simulasi transformator E-I	72
Gambar 4.13	Perbandingan bentuk gelombang simulasi transformator E/E	72

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 3.1	Spesifikasi transformator uji
Tabel 3.2	Hasil pengujian hubung singkat transformator satu fasa E-I
Tabel 3.3	Hasil perhitungan parameter resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen transformator satu fasa E-I
Tabel 3.4	Hasil pengujian hubung singkat transformator satu fasa E/E
Tabel 3.5	Hasil perhitungan parameter resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen transformator satu fasa E/E
Tabel 3.6	Hasil pengujian tanpa beban transformator satu fasa E-I
Tabel 3.7	Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator satu fasa E-I
Tabel 3.8	Hasil pengujian tanpa beban transformator satu fasa E/E
Tabel 3.9	Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator satu fasa E/E
Tabel 3.10	Hasil pengujian sumber DC transformator satu fasa E-I
Tabel 3.11	Hasil perhitungan parameter resistansi primer, resistansi sekunder, reaktansi primer dan reaktansi sekunder transformator satu fasa E-I
Tabel 3.12	Hasil pengujian sumber DC transformator satu fasa E/E
Tabel 3.13	Hasil perhitungan parameter resistansi primer, resistansi sekunder, reaktansi primer dan reaktansi sekunder transformator satu fasa E/E
Tabel 3.14	Hasil <i>open circuit test</i> transformator satu fasa E-I pada sisi sekunder
Tabel 3.15	Hasil <i>open circuit test</i> transformator satu fasa E/E pada sisi sekunder
Tabel 3.16	Hasil simulasi transformator satu fasa E-I

Tabel 3.17	Hasil simulasi transformator satu fasa E/E	44
Tabel 3.18	Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E-I	45
Tabel 3.19	Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E/E	47
Tabel 3.20	Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E-I	50
Tabel 3.21	Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E/E	51
Tabel 3.22	Parameter yang dibutuhkan	54
Tabel 3.23	Spesifikasi sumber sistem satu fasa di laboratorium	58
Tabel 4.1	Hasil eksperimen arus <i>inrush</i> pada transformator E-I	64
Tabel 4.2	Hasil eksperimen arus <i>inrush</i> pada transformator E/E	66
Tabel 4.3	Hasil eksperimen dan simulasi pada transformator E-I	69
Tabel 4.4	Hasil eksperimen arus <i>inrush</i> pada transformator E-I	70
Tabel 4.5	Hasil eksperimen dan simulasi pada transformator E/E	70
Tabel 4.6	Hasil estimasi fluks sisa pada kedua transformator	70

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik membutuhkan berbagai peralatan untuk mendukung kinerja dari sistem tersebut. Salah satu peralatan yang penting dalam sistem tenaga listrik adalah transformator. Transformator memiliki fungsi sebagai alat untuk menaikkan level tegangan (*step up*) maupun menurunkan level tegangan (*step down*) dari sistem transmisi menuju ke sistem distribusi, sehingga daya listrik bisa tersalurkan ke beban-beban, seperti rumah tangga, perkantoran hingga industri [1]. Prinsip kerjanya dari transformator adalah tegangan arus bolak-balik pada belitan primer, menghasilkan arus listrik bolak-balik pada belitan primer. Arus tersebut menghasilkan fluks magnetik bolak-balik pada inti berbahan magnetik. Fluks magnetik bolak-balik menginduksi tegangan pada setiap belitan sekunder [2].

Sebagai salah satu peralatan yang sangat penting pada sistem tenaga listrik tentunya transformator harus mempunyai sistem proteksi yang baik agar terlindung dari gangguan yang ada. Keandalan dari sebuah transformator harus diperhatikan karena semakin handal sebuah transformator, maka kontinuitas daya pada sistem juga terjamin. Beberapa fenomena pada transformator dapat mempengaruhi kinerja dari sistem proteksi pada transformator. Salah satu fenomena karakteristik pada peralatan listrik yang perlu diperhatikan adalah arus *inrush* (*Inrush Current*) [3]. Fenomena tersebut dapat terjadi saat transformator dilakukan pengisian daya (*energize*) pertama kali dan dalam keadaan tidak berbeban. Dengan adanya fenomena tersebut kondisi transformator saat pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan arus magnetisasi dapat mencapai 10-20 kali arus *rating* [4].

Arus *inrush* transformator yang tinggi bisa menyebabkan penurunan kualitas transformator, mengurangi usia dari transformator karena arus yang besar tersebut akan mempengaruhi kinerja dari rele proteksi yang ada pada transformator., dan akan menurunkan kekuatan isolasi belitan pada transformator. Salah satu penyebab dari arus *inrush* yang tinggi adalah adanya fluks sisa pada inti transformator yang terjadi saat proses pengisian daya (*energize*) atau penyambungan transformator ke sistem pada waktu sebelum-sebelumnya. Waktu yang dibutuhkan fluks sisa

untuk menghilang dari inti transformator belum bisa ditentukan dan fluks sisa merupakan fenomena yang sulit untuk dihindari.

Permasalahan mengenai fluks sisa yang dapat menyebabkan meningkatnya arus *inrush* pada transformator 1-fasa akan dibahas pada tugas akhir ini yang berjudul "*Estimasi Fluks Sisa pada Transformator 1-Fasa Menggunakan Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan*". Permasalahan pada tugas akhir ini akan diselesaikan menggunakan pemodelan pada *simulink* di *software* MATLAB. Fluks sisa pada transformator yang ada saat transformator dienergisasi kembali setelah transformator berhenti beroperasi menjadi masalah karena besarnya akan mempengaruhi besarnya arus *inrush*. Maka dari itu dibutuhkan suatu pengukuran yang dapat mengestimasi seberapa besar fluks sisa yang dapat mempengaruhi arus *inrush*. Pengaruh dari fluks sisa pada arus *inrush* akan dianalisis dalam tugas akhir ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengestimasi nilai fluks sisa melalui pengukuran arus *inrush* menggunakan pemodelan dinamis transformator 1-fasa dua belitan dan pengukuran langsung dan membandingkan nilai-nilai tersebut pada dua cara potong inti yang berbeda. Penelitian tugas akhir ini bermanfaat untuk menjadi referensi dalam penentuan waktu untuk *me-re-energize* transformator yang tepat sehingga dapat mengurangi terjadinya arus *inrush*. Dengan demikian diharapkan penelitian tugas akhir ini dapat menjadi referensi penelitian selanjutnya sehingga dapat berkembang lebih jauh lagi.

Metode penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini, diawali dengan mendapatkan beberapa parameter yang menjadi referensi pengujian langsung transformator 1-fasa yang diamati. Parameter-parameter yang diperlukan adalah data transformator yang akan diuji yaitu cara pemotongan inti transformator, tegangan yang diberikan pada belitan primer dan sekunder transformator, kapasitas transformator, arus rating dan jumlah lilitan pada transformator. Selanjutnya akan dilakukan pengujian *open circuit test*, *short circuit test*, dan *DC test* untuk mendapatkan parameter transformator berupa arus, daya, dan impedansi yang ada pada transformator. Setelah mendapatkan semua parameter tersebut langkah berikutnya memodelkan transformator ke dalam *simulink* pada *software* MATLAB yang akan menghasilkan data besarnya arus *inrush*. Parameter-parameter pada transformator yang diuji akan dimasukkan ke dalam pemodelan tersebut sehingga didapatkan hasil simulasi yang sesuai. Setelah itu transformator akan diuji melalui eksperimen laboratorium yang dapat mengukur arus *inrush*

yang ada pada transformator tersebut. Setelah mendapatkan data dari metode simulasi dan metode eksperimen laboratorium, hasilnya akan dibandingkan sehingga akan terlihat pengaruh dari fluks sisa terhadap arus *inrush*. Perbandingan dari kedua hasil pengukuran tersebut akan dianalisis sehingga dapat ditarik kesimpulan yang dapat menjawab permasalahan pada tugas akhir ini.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada laporan tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab yang akan tersaji, pada bab satu akan membahas tentang latar belakang dari penelitian tugas akhir ini, kemudian rumusan masalah dalam tugas akhir ini, tujuan yang ingin dicapai, metode penelitian, sistematika penelitian dan relevansi dari penelitian tugas akhir ini.

Selanjutnya pada bab dua penelitian tugas akhir ini akan membahas tentang tinjauan pustaka dari penelitian ini yang terdiri dari teori transformator dan karakteristiknya serta teori dari arus *inrush* yang digunakan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini.

Kemudian pada bab tiga tugas akhir ini menjelaskan mengenai metode yang digunakan untuk menentukan parameter-parameter pada transformator, arus saturasi pada transformator, kurva magnetisasi pada transformator dan menjelaskan tentang pemodelan dinamis transformator dua belitan menggunakan *simulink* pada *software* MATLAB untuk mendapatkan perbandingan dengan eksperimen.

Pada bab empat tugas akhir ini menjelaskan tentang analisis data hasil simulasi dan eksperimen terkait dengan pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan arus *inrush*.

Kemudian pada bab lima dijabarkan mengenai kesimpulan hasil penelitian tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TRANSFORMATOR

2.1 Pengertian Transformator

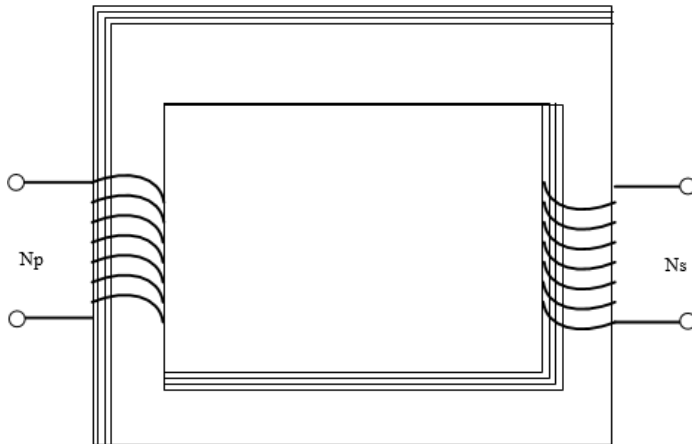
Transformator merupakan peralatan listrik yang sangat penting dalam suatu sistem tenaga listrik, karena memiliki fungsi untuk menkonversi level tegangan bolak-balik (*Alternating Current*) yang satu ke level yang lainnya dengan menerapkan konsep dari medan magnet. Transformator memiliki dua lilitan atau lebih yang mengelilingi inti feromagnetik. Dengan sumber tegangan bolak-balik yang diberikan pada salah satu kumparan, maka akan menghasilkan fluks bolak-balik dan memiliki amplitud yang nilainya bergantung dengan besar tegangan dan frekuensi sumber serta jumlah kumparan pada transformator. Fluks bolak-balik yang dihasilkan pada kumparan mengakibatkan munculnya fluks *mutual* diantara kumparan yang ada di sisi sumber dan sisi lainnya. Fluks *mutual* tersebut akan menginduksikan tegangan dari kumparan sisi sumber menuju kumparan pada sisi lainnya yang biasanya tidak bersentuhan secara langsung melalui inti besi.

Transformator bekerja dengan prinsip medan elektromagnetik. Karena kumparan primer maupun sekunder tidak berhubungan secara langsung, melainkan dililitkan pada sebuah inti besi maka medan yang arahnya bertabrakan dengan inti besi, menyebabkan adanya fluks *mutual* yang berubah terhadap waktu. Mekanisme kerja seperti itu dapat terjadi pada dua lilitan yang dikopel melalui udara. Namun kopel antar lilitan dapat dibuat lebih optimal menggunakan inti berbahan feromagnetik seperti besi atau baja, karena banyak fluks mengalir yang dapat dibatasi pada jalur hubung antar lilitan yang ditentukan dan memiliki permeabilitas yang tinggi.

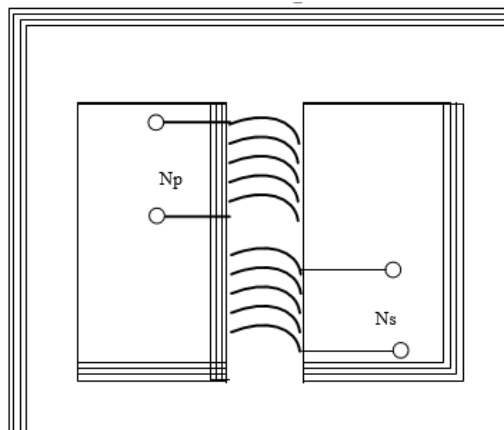
Transformator sebagai salah satu peralatan dalam sistem tenaga listrik mempunyai tiga bagian utama yang menyusun transformator, yaitu kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti besi transformator yang memiliki fungsi masing-masing. Fungsi dari kumparan primer dan kumparan sekunder adalah tempat timbulnya fluks yang dapat menginduksikan tegangan, bila pada kumparan sekunder diberikan beban maka akan mengalir arus. Untuk fungsi dari inti besi pada transformator sendiri adalah tempat fluks *mutual* berada yang dihasilkan oleh kedua kumparan pada transformator.

2.2 Jenis dan Konstruksi pada Transformator

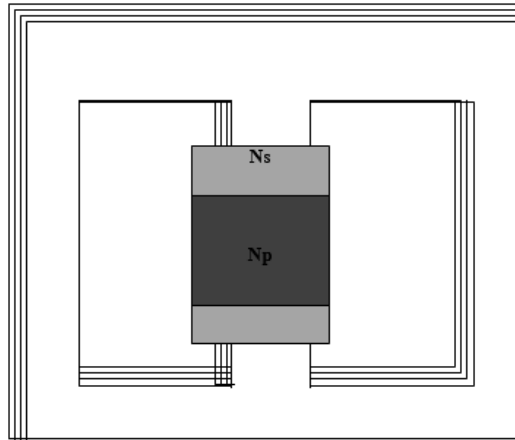
Pada dasarnya transformator dibagi menjadi 2 jenis jika dilihat berdasarkan konstruksi dari transformator, yaitu tipe inti (*core-form*) dan tipe cangkang (*shell-form*).



Gambar 2.1 Transformator tipe inti (*core-form*)



Gambar 2.2 Transformator tipe cangkang (*shell-form*)
kumparan tidak saling menumpuk



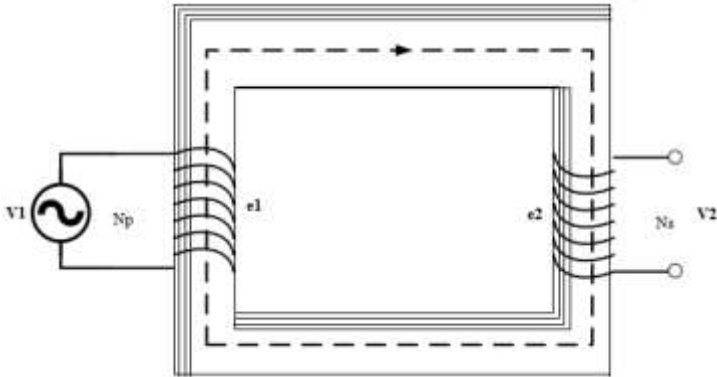
Gambar 2.3 Transformator tipe cangkang (*shell-form*) kumparan saling menumpuk

Pada transformator tipe inti (*core-form*), kumparan primer dan kumparan sekunder digulung pada sisi lengan transformator yang berbeda atau dapat dikatakan dua kumparan transformator mengelilingi inti. Pada gambar 2.1 terlihat bentuk dari transformator tipe inti (*core-form*). Sementara itu, pada tipe cangkang (*shell-form*), Kumparan dililitkan pada salah satu lengan inti transformator yang memiliki tiga lengan inti magnetik. Terdapat dua macam tipe kumparan dibagi menurut konstruksinya, yaitu kumparan primer dan sekunder yang dililitkan pada salah satu lengan yang berada di tengah dari inti transformator disusun secara tidak saling menumpuk seperti pada gambar 2.2, serta kumparan primer dan sekunder yang dililit saling menumpuk pada satu lengan saja, seperti pada gambar 2.3.

2.3 Transformator Ideal

Sebuah transformator dapat diklasifikasikan menjadi transformator ideal apabila pada transformator tersebut tidak ada rugi-rugi dan tidak ada fluks bocor. Transformator ideal memiliki sifat tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator, sehingga daya listrik pada kumparan sekunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Dengan kondisi tersebut, menandakan bahwa

efisiensi pada transformator ideal adalah seratus persen. Model dari transformator ideal ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Transformator ideal tidak berbeban

Besarnya gaya gerak listrik pada kumparan primer dipengaruhi oleh banyaknya jumlah belitan dan fluks yang berubah terhadap waktu. Secara sistematis, kondisi ini dapat ditulis dalam persamaan 2.1.

$$e_1 = N_p \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Fluks yang dihasilkan menginduksi kumparan sekunder, sehingga menghasilkan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder sebagai berikut.

$$-e_2 = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Jika polaritas diabaikan, dan fluks yang dihasilkan pada kumparan primer diasumsikan sama dengan yang dihasilkan pada kumparan sekunder, maka akan didapatkan:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d\phi_2}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.4)$$

Dari semua persamaan yang tertera di atas dapat disimpulkan bahwa :

- a) Jika N_p lebih besar dari N_s , maka transformator tersebut menjadi bersifat *step down* atau dapat menurunkan level tegangan.
- b) Jika N_p lebih kecil dari N_s , maka transformator tersebut menjadi bersifat *step up* atau dapat meningkatkan level tegangan.

2.4 Transformator Tidak Ideal

Pengaruh resistansi kumparan walaupun nilainya tidak terlalu besar, pengaruh fluks bocor yang diakibatkan oleh resistansi kumparan pada transformator, dan arus eksitasi karena permeabilitas inti yang terbatas, dapat menyebabkan transformator menjadi tidak ideal atau efisiensinya tidak seratus persen. Salah satu faktor ketidakidealan transformator adalah fluks bocor. Tidak semua fluks yang dihasilkan mengalir melalui kumparan sekunder. Ada beberapa bagian fluks yang mengalir bebas ke udara sehingga disebut fluks bocor. Ketidakidealan transformator atau transformator tidak dapat berkerja secara maksimal juga dapat diabaikan oleh rugi tembaga dan rugi inti. Rugi inti dipengaruhi oleh resistansi inti dan reaktansi magnetik yang terjadi pada inti transformator sehingga menghasilkan rugi histerisis dan rugi arus *eddy*.

Nilai arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet dipengaruhi oleh permeabilitas rangkaian magnetik yang terbatas. Fungsinya untuk mempertahankan fluks yang dibutuhkan transformator agar beroperasi. Rumus yang menunjukkan hubungan antara arus dan gaya gerak magnet terhadap kerapatan fluks adalah sebagai berikut,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \frac{\Phi}{A} \quad (2.5)$$

Arus dan gaya gerak magnet yang dibutuhkan memiliki nilai yang sebanding dengan kerapatan fluks (\mathbf{B}) yang terjadi pada inti transformator. Sedangkan nilai dari \mathbf{H} didapatkan dari rumus berikut ini,

$$\mathbf{H} = \frac{Ni}{l_c} \quad (2.6)$$

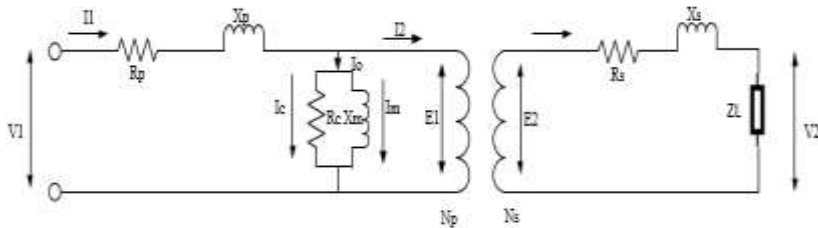
Di dalam rumus terdapat nilai l_c yang merupakan panjang jalur magnetik dari suatu inti transformator. Sehingga didapatkan rumus untuk menentukan nilai fluks sebagai berikut,

$$\Phi = \int B \cdot dS = A\mu \frac{Ni}{l_c} \quad (2.7)$$

Saat transformator tidak ideal beroperasi dan mengalami kondisi saturasi, arus yang diperlukan harus menyesuaikan dengan ketidaklinieran inti untuk menghasilkan tegangan. Reaktansi induktif dari rangkaian magnetisasi pada inti juga mempengaruhi besarnya nilai arus. Sehingga, arus magnetisasi didapatkan dari tegangan sumber dibagi dengan reaktansi magnetisasi. Rangkaian magnetisasi ini dapat menjadi rugi-rugi yang perlu diperhatikan karena rangkaian magnetisasi tersebut dapat mendisipasikan daya yang bergantung pada kerapatan fluks yang beroperasi.

2.4.1 Rangkaian Ekivalen Transformator Tidak Ideal

Rangkaian ekivalen pada transformator sangat penting untuk menganalisis suatu transformator dengan kondisi seperti keadaan yang nyata, dengan memerhatikan rugi-rugi kumparan dan komponen magnetisasi inti, seperti resistansi inti dan reaktansi magnetisasi. Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian ekivalen transformator tidak ideal karena terlihat parameter dari resistansi inti dan reaktansi magnetisasi



Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen dari transformator 1-fasa

Terdapat beberapa persamaan yang didapatkan dari rangkaian ekivalen di atas yaitu sebagai berikut:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_p + I_1 X_p \quad (2.8)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_s + I_2 X_s \quad (2.9)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (2.10)$$

Dari persamaan 2.9 dan 2.10 di atas didapatkan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_s + I_2 X_s) \quad (2.11)$$

Jika nilai I_2 didapatkan dari persamaan sebelumnya, maka persamaan menjadi seperti berikut ini :

$$I_2 = a I'_2 \quad (2.12)$$

$$E_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_s + a^2 I'_2 X_s \quad (2.13)$$

$$V_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_s + a^2 I'_2 X_s + I_1 R_p + I_1 X_p \quad (2.14)$$

Ketika rangkaian ekivalen disederhanakan maka akan didapatkan nilai dari R_{eq} dan X_{eq} melalui persamaan berikut ini :

$$R_{eq} = R_p + \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \cdot R_s \quad (2.15)$$

$$X_{eq} = X_p + \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \cdot X_s \quad (2.16)$$

Dimana: V_1 = Tegangan primer (V)

V_2 = Tegangan sekunder (V)

E_1 = Gaya gerak listrik di sisi primer (V)

E_2 = Gaya gerak listrik di sisi sekunder (V)

R_p = Hambatan primer (Ω)

R_s = Hambatan sekunder (Ω)

I_1 = Arus primer (A)

I_2 = Arus sekunder (A)

X_p = Reaktansi primer (Ω)

X_s = Reaktansi sekunder (Ω)

N_p = Jumlah lilitan primer

N_s = Jumlah lilitan sekunder

Z_L = Impedansi beban transformator (Ω)

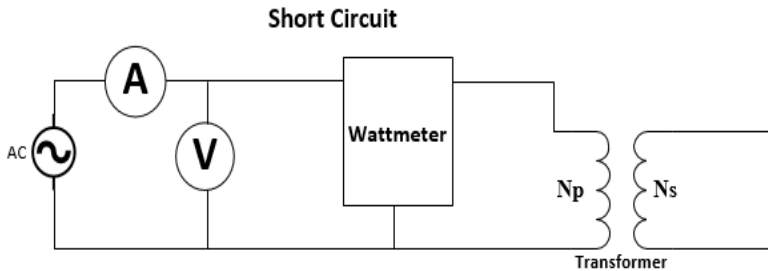
a = Rasio pada transformator

2.4.2 Parameter Rangkaian Ekivalen Transformator

Pada transformator terdapat beberapa parameter yang diperlukan untuk menghasilkan sebuah rangkaian ekivalen transformator tidak ideal yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Terdapat beberapa pengujian yang diperlukan untuk mendapatkan parameter tersebut. Pengujian tersebut adalah sebagai berikut :

1. Pengujian hubung singkat (*short circuit test*)
2. Pengujian tanpa beban (*open circuit test*)
3. Pengujian sumber DC (*DC test*).

Masing-masing pengujian memiliki fungsinya tersendiri. Pengujian hubung singkat fungsinya untuk mengetahui parameter yang terdapat pada kumparan transformator yaitu nilai dari R_{eq} dan X_{eq} atau hambatan ekivalen dan reaktansi ekivalen. Pengujian hubung singkat dilakukan dengan menghubungkan sisi sekunder dengan impedansi yang mendekati nol, sehingga hanya impedansi $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ yang membatasi nilai arus. Tegangan di sisi sekunder pada pengujian hubung singkat yang relatif kecil menyebabkan tegangan jatuh pada R_c dan / atau X_m sangat kecil juga, sehingga nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu, nilai tegangan yang diperoleh merupakan tegangan pada Z_{eq} . Skema pengujian hubung singkat pada transformator dapat dilihat melalui gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema pengujian transformator hubung singkat

Berdasarkan skema pengujian transformator hubung singkat di atas, didapatkan persamaan untuk parameter sebagai berikut:

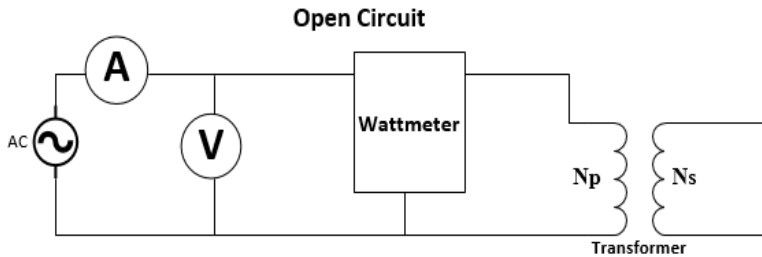
$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.17)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (2.18)$$

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)} \quad (2.19)$$

Dimana: R_{eq} = Resistansi ekivalen (Ω)
 X_{eq} = Reaktansi ekivalen (Ω)
 Z_{eq} = Impedansi ekivalen (Ω)
 V_{sc} = Tegangan primer hubung singkat (V)
 I_{sc} = Arus primer hubung singkat (A)
 P_{sc} = Daya hubung singkat (Watt)

Lalu terdapat pengujian kondisi tanpa beban digunakan untuk mendapatkan nilai dari parameter inti pada transformator, yaitu R_c dan X_m . Dalam keadaan tanpa beban, jika kumparan primer dihubungkan dengan tegangan V_p , maka hanya I_{oc} yang mengalir dari pengukuran daya yang masuk (P_{oc}). Karena nilai impedansi lilitan di kumparan primer jauh lebih kecil dibandingkan nilai impedansi inti, maka nilai impedansi lilitan pada pengujian ini dapat diabaikan. Diagram pengujian transformator tanpa beban dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema pengujian transformator tanpa beban

Berdasarkan skema pengujian transformator tanpa beban di atas, didapatkan persamaan untuk parameter sebagai berikut:

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (2.20)$$

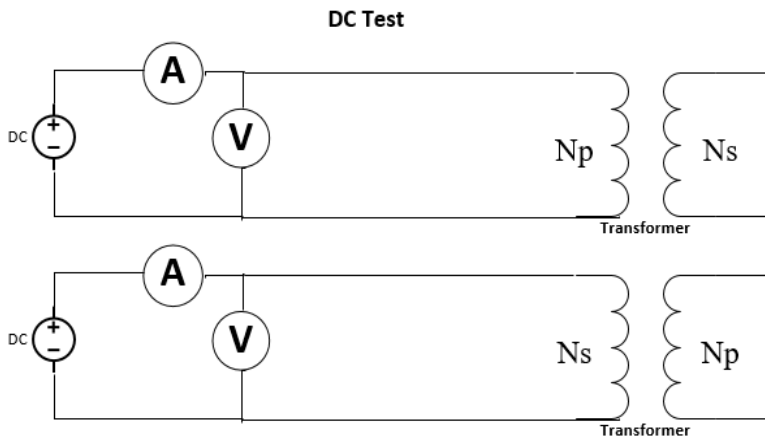
$$S = V_{oc} * I_{oc} \quad (2.21)$$

$$Q_{oc} = \sqrt{(S^2 - P_{oc}^2)} \quad (2.22)$$

$$X_m = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} \quad (2.23)$$

Dimana: R_c = Resistansi inti (Ω)
 X_m = Reaktansi magnetisasi (Ω)
 V_{oc} = Tegangan primer tanpa beban (V)
 I_{oc} = Arus primer tanpa beban (A)
 P_{oc} = Daya primer tanpa beban (Watt)
 Q_{oc} = Daya reaktif tanpa beban (VAR)
 S = Daya semu tanpa beban (VA)

Yang terakhir adalah pengujian sumber DC pada sisi primer dan sisi sekunder transformator, digunakan untuk mendapatkan nilai dari parameter kumparan primer dan sekunder pada transformator, yaitu R_p dan R_s . Dalam keadaan tanpa beban, jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber DC, maka akan terukur nilai arus sisi primer ketika dihubungkan ke primer dan arus sisi sekunder ketika dihubungkan ke sekunder. Diagram pengujian transformator sumber tegangan DC dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema pengujian transformator sumber tegangan DC

Berdasarkan skema pengujian transformator sumber tegangan DC di atas, didapatkan persamaan untuk parameter sebagai berikut:

$$R_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (2.24)$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (2.25)$$

Dimana: R_p = Resistansi primer (Ω)

R_s = Resistansi sekunder (Ω)

V_p = Tegangan primer (V)

V_s = Tegangan sekunder (V)

I_p = Arus primer (A)

I_s = Arus sekunder (A)

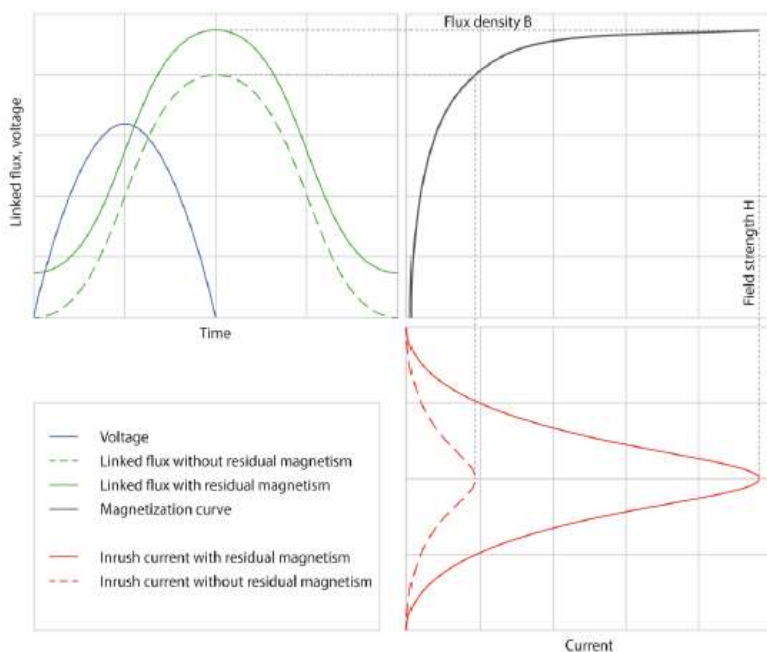
2.5 Arus *Inrush* Pada Transformator

Selama re-energization transformator tidak berbeban, dapat muncul efek yang tidak diinginkan (arus inrush, tegangan lebih, dynamic stress, resonansi, dll) dan dapat menyebabkan banyak masalah pada sistem tenaga, terutama pada transformator. Penentuan fluks residu memungkinkan untuk menghitung waktu yang tepat untuk re-energization dari transformator daya [5].

Arus inrush terjadi ketika sumber tegangan bolak-balik dihubungkan ke transformator untuk pertama kalinya, maka akan muncul aliran arus magnetisasi yang melewati kumparan yang terhubung oleh sumber tegangan tersebut meskipun kumparan yang berada di sisi lainnya tidak terhubung. Arus inrush dibutuhkan untuk proses energisasi pada transformator untuk pertama kalinya sehingga menghasilkan fluks pada inti ferromagnetik. Arus ini dibutuhkan hingga nilai maksimum fluks mencapai kondisi steady-state dan inti menjadi saturasi. Arus inrush adalah masalah yang sangat penting bagi desainer transformator. Hal ini memberi efek pada koordinasi rele karena arus akan memiliki nilai sepuluh sampai dua puluh kali (bahkan lebih) dari arus selama periode transien. Ini perilaku abnormal dari arus inrush yang menyebabkan rele menjadi beroperasi [6].

Arus inrush timbul pada transformator ketika fluks sisa tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi steady-state, terutama pada

titik-titik gelombang tegangan tertentu. Laju perubahan fluks sesaat pada transformator memiliki nilai yang sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada kumparan yang terhubung sumber. Selama transformator dioperasikan secara terus-menerus, nilai fluks puncak berada pada level negative saat tegangan berada pada titik nol. Namun, selama energisasi, fluks tersebut harus bermula pada titik nol. Sehingga, untuk menaikkan tegangan nol, fluks magnet tersebut akan mencapai nilai puncak yang nilainya berkali-kali lipat dibandingkan dengan pada saat dalam kondisi normal. Akibat ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi, pada kondisi saturasi, jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding diperlukan untuk membangkitkan fluks magnet. Sehingga, arus kumparan yang diperlukan untuk membuat gaya gerak magnet dapat menimbulkan fluks pada inti transformator akan meningkat dibandingkan pada saat kondisi normal [7]. Pada gambar 2.9 dapat dilihat fenomena arus inrush dan hubungannya dengan fluks sisa.



Gambar 2.9 Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks

Nilai puncak arus *inrush* adalah sebuah fungsi yang terdiri atas tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, dan kerapatan medan magnet saturasi, resistansi kumparan primer dan induktansi transformator. Berdasarkan pada studi [8], nilai puncak arus *inrush* dapat diperoleh berdasarkan parameter-parameter transformator ketika dalam keadaan beroperasi. Sehingga, secara matematis, nilai arus *inrush* dapat diperoleh melalui persamaan:

$$i_{max} = \frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cdot \left(\frac{2B_n + B_r + B_s}{B_n} \right) \quad (2.26)$$

Dimana: V_m = Tegangan terhubung maksimum (V)

L = Induktansi transformator (H)

R = Resistansi total transformator (Ω)

B_n = Kerapatan medan magnet normal (Wb/m²)

B_r = Kerapatan medan magnet residu (Wb/m²)

B_s = Kerapatan medan magnet saturasi (Wb/m²)

Nilai dari kerapatan medan magnet normal (B_n) didapatkan ketika transformator beroperasi dengan normal. Sedangkan kerapatan medan magnet residu (B_r) dan kerapatan medan magnet saturasi (B_s) didapatkan nilainya dari permeabilitas inti transformator. Sehingga, bila transformator memiliki jenis material yang berbeda, nilai arus *inrush* dapat berbeda walaupun kapasitas sama. Kedua parameter tersebut nilainya tergantung pada kurva magnetisasi dari transformator, terutama untuk memperoleh nilai B_r yang tampak pada saat intensitas medan magnet bernilai nol. Gambar 2.7 di atas menjelaskan bahwa adanya fluks sisa pada inti transformator berpengaruh pada kurva magnetisasi. Semakin tinggi nilai magnetisasi (saturasi), semakin tinggi pula arus yang dihasilkan. Maka dari itu fluks residu sangat mempengaruhi nilai dari arus *inrush* transformator.

Metode untuk menghitung fluks residu telah banyak dikembangkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Metode yang lain untuk melakukan perhitungan fluks residu adalah menggunakan nilai arus maksimal. Prinsipnya adalah menghitung fluks residu dari arus *inrush* yang diperoleh ketika transformator di-*re-energized* [9]. Biasanya fluks residu tidak langsung dapat diukur, tetapi dilakukan pendekatan dengan integral dari tegangan di terminal transformator [10]. Fluks residu juga

dapat diestimasi dengan metode pengukuran fluks bocor dengan sensor *fluxgate* yang diletakkan pada transformator 1-fasa yang ada pada penelitian sebelumnya. Tetapi pada penelitian tugas akhir ini metode yang digunakan adalah pemodelan transformator pada *simulink*.

2.6 Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Menggunakan *SIMULINK*

Pada pemodelan dinamis transformator 1-fasa dua belitan ini dibagi dalam beberapa bagian yaitu bagian primer, bagian inti, dan bagian sekunder yang didefinisikan dalam bentuk rumus dengan parameter yang didapatkan dari beberapa pengujian yang ada di transformator. Pengujian tersebut adalah *open circuit test*, *short circuit test*, dan *DC test*.

Dari pemodelan dinamis transformator 1-fasa dapat menjadi tiga bagian, yaitu bagian sisi primer transformator, bagian sisi sekunder transformator dan inti transformator. Dalam kasus ini, akan diambil fluks *linkage* total dari dua belitan sebagai variabel kondisi. Untuk keadaan dari variabel kondisi tersebut, persamaan tegangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$v_1 = i_1 * r_1 + \left(\frac{1}{\omega_b}\right) * \left(\frac{d\psi_1}{dt}\right) \quad (2.27)$$

$$v_2' = i_2' * r_2' + \left(\frac{1}{\omega_b}\right) * \left(\frac{d\psi_2'}{dt}\right) \quad (2.28)$$

Dimana $\psi_1 = \omega_b \lambda_1$, $\psi_2 = \omega_b \lambda_2$ dan ω_b merupakan frekuensi *base* yang mana merupakan reaktansi terhitung. Fluks *linkage* per detik dari belitan dapat ditulis menjadi persamaan,

$$\psi_1 = \omega_b * \lambda_1 = x_{l1} i_1 + \psi_m \quad (2.29)$$

$$\psi_2' = \omega_b * \lambda_2' = x_{l2}' i_2' + \psi_m \quad (2.30)$$

$$\psi_m = \omega_b * L_{m1} (i_1 + i_2') = x_{m1} (i_1 + i_2') \quad (2.31)$$

Untuk mencari arus i_1 dan arus i_2' dapat digunakan persamaan 2.29 dan 2.30, sehingga menjadi,

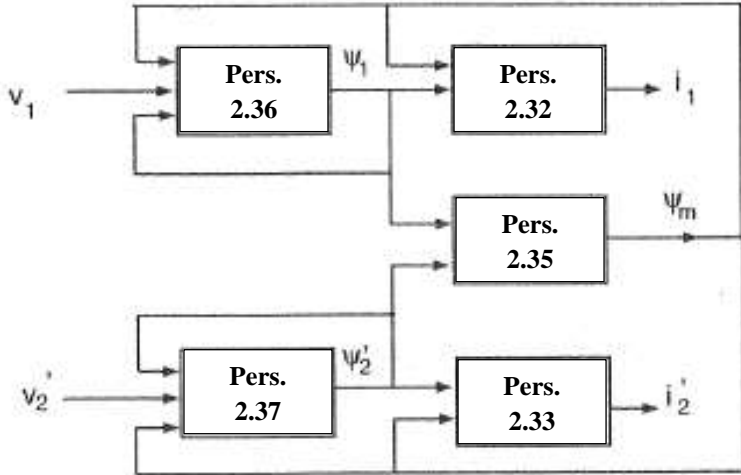
$$i_1 = \frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} \quad (2.32)$$

$$i_2' = \frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \quad (2.33)$$

Kemudian, persamaan 2.32 dan persamaan 2.33 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.31. Sehingga akan didapatkan persamaan matematis,

$$\frac{\psi_m}{x_{m1}} = \frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} + \frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \quad (2.34)$$

$$\psi_m = x_M * \left(\frac{\psi_1}{x_{l1}} + \frac{\psi_2'}{x_{l2}'} \right) \quad (2.35)$$



Gambar 2.10 Diagram persamaan pada pemodelan transformator 1-fasa dua belitan

Dengan menggunakan persamaan 2.34 dan 2.35 untuk menggantikan arus, persamaan 2.27 dan persamaan 2.28 dapat dijabarkan menjadi persamaan integral dari dua fluks *linkage* total, yaitu,

$$\psi_1 = \int \left\{ \omega_b v_1 - \omega_b r_1 \left(\frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} \right) \right\} dt \quad (2.36)$$

$$\psi_2' = \int \left\{ \omega_b v_2' - \omega_b r_2' \left(\frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \right) \right\} dt \quad (2.37)$$

Persamaan 2.32, 2.33, 2.35, 2.36, dan 2.37 merupakan persamaan model dinamika dasar dari transformator 1-fasa dimana ketidaklinieran magnetisasi dan rugi inti dapat ditambahkan jika dibutuhkan. Pada model ini, fluks *linkage* merupakan variabel internal, tegangan terminal merupakan tegangan masukan yang diperlukan, dan arus belitan merupakan keluaran utama. Sehingga, dari persamaan-persamaan di atas dapat diimplementasikan seperti pada gambar 2.10.

BAB 3

PEMODELAN DINAMIS TRANSFORMATOR 1-FASA DUA BELITAN DAN EKPERIMEN PENGUKURAN ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR

Bab ini akan menjelaskan beberapa metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini. Metodologi tersebut terdiri dari pengujian untuk mencari parameter-parameter yang terdapat pada transformator uji, lalu transformator 1-fasa yang diuji dimodelkan dalam pemodelan dinamis pada *simulink* di *software* MATLAB. Setelah mendapatkan hasil dari pemodelan transformator selanjutnya dilakukan eksperimen pengukuran arus *inrush* dengan meng-*energize* transformator menggunakan modul pensaklaran dan proses demagnetisasi untuk mengurangi fluks sisa pada transformator.

3.1 Spesifikasi Transformator Uji

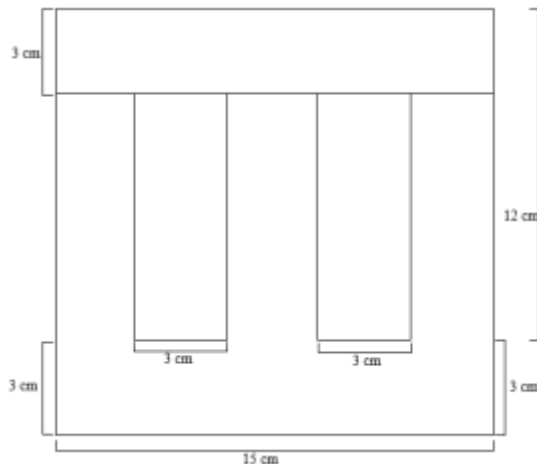
Transformator yang diuji dalam penelitian tugas akhir ini adalah tranformator 1-fasa dengan kapasitas daya 1 kVA. Terdapat dua jenis transformator yang akan diuji, yaitu transformator E-I dan transformator E/E dengan keduanya memiliki cara potong inti yang berbeda. Tetapi beberapa parameter seperti tegangan primer, tegangan sekunder, kapasitas daya, frekuensi, dan jumlah belitan dari kedua transformator tersebut memiliki nilai yang sama, ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator uji

Spesifikasi Transformator Uji	
Tipe	Shell
Fasa	1 Fasa
Kapasitas Daya	1000 VA
Tegangan Primer	220 V
Tegangan Sekunder	127 V
Jumlah Belitan Primer	255 Belitan
Jumlah Belitan Sekunder	147 Belitan
Frekuensi	50 Hz

3.1.1 Spesifikasi Transformator E-I

Transformator 1-fasa E-I memiliki cara potong inti yang normal seperti cara potong inti transformator pada umumnya, Cara potong inti tersebut ditunjukkan pada gambar 3.1 dengan ketebalan 8.5 cm dan ukuran lainnya terlihat pada gambar.



Gambar 3.1 Topologi inti pada transformator 1-fasa E-I

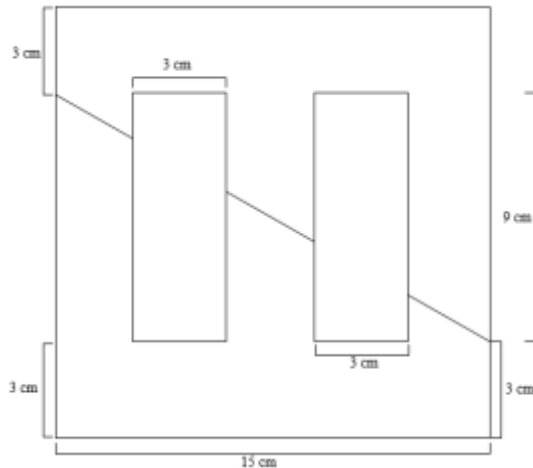
Transformator 1-fasa E-I dengan cara potong inti normal seperti pada gambar 3.2 memiliki bentuk sebagai berikut.



Gambar 3.2 Bentuk transformator 1-fasa E-I

3.1.2 Spesifikasi Transformator E/E

Transformator 1-fasa E/E memiliki cara potong inti yang sudah dimodifikasi dengan potongan yang diagonal tidak seperti potongan inti pada transformator umumnya. Cara potong inti tersebut ditunjukkan pada gambar 3.3 dengan ketebalan 8.5 cm dan ukuran lainnya terlihat pada gambar.



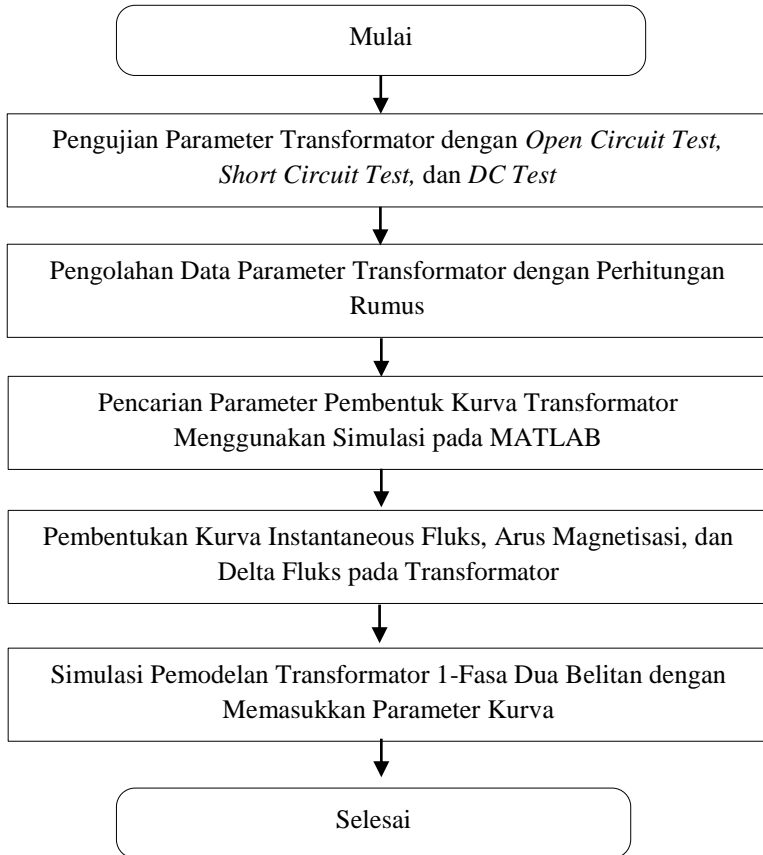
Gambar 3.3 Topologi inti pada transformator 1-fasa E/E

Transformator 1-fasa E/E dengan cara potong inti yang sudah dimodifikasi seperti pada gambar 3.4 memiliki bentuk sebagai berikut.



Gambar 3.4 Bentuk transformator 1-fasa E/E

3.2 Simulasi Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan



Gambar 3.5 Skema simulasi arus *inrush*

Transformator 1-fasa dalam penelitian tugas akhir ini dimodelkan dalam *simulink* untuk mendapatkan nilai arus *inrush* sehingga dapat diestimasi nilai fluks sisa pada transformator yang disimulasikan. Simulasi pada penelitian tugas akhir ini membutuhkan beberapa parameter yang didapatkan melalui pengujian pada transformator 1-fasa.

Pengujian tersebut untuk mendapat nilai parameter rangkaian ekivalen transformator dan mendapatkan parameter pada kurva yang dimiliki transformator. Pembentukan kurva pada transformator juga dibutuhkan untuk mengetahui karakteristik pada transformator sehingga beberapa parameter yang perlu dimasukkan ke dalam pemodelan transformator didapatkan nilainya. Alur pengujian dan simulasi pada tugas akhir ini terdapat pada gambar 3.5.

3.2.1 Pengujian Parameter pada Transformator

Rangkaian ekivalen pada transformator memiliki parameter yang didapatkan dari beberapa pengujian yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Beberapa pengujian tersebut yaitu pengujian tanpa beban (*open circuit test*) yang fungsinya untuk mendapatkan nilai resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m), lalu pengujian hubung singkat (*short circuit test*) untuk mendapatkan nilai resistansi ekivalen (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen (X_{eq}), dan yang terakhir pengujian tegangan DC pada sisi primer dan sisi sekunder transformator, digunakan untuk mendapatkan nilai dari parameter kumparan primer dan sekunder pada transformator, yaitu resistansi primer (R_p), resistansi sekunder (R_s), reaktansi primer (X_p), dan reaktansi sekunder (X_s).

3.2.1.1 Pengujian Hubung Singkat (*Short Circuit Test*)

Pengujian hubung singkat (*short circuit test*) dapat dilakukan dengan mengikuti rangkaian pengujian pada gambar 2.4 yang terdapat di bab sebelumnya. Langkah-langkah berikut yang harus dilakukan untuk pengujian hubung singkat (*short circuit test*) pada transformator:

1. Hubungkan sumber tegangan bolak balik pada sisi primer transformator atau dalam studi ini sisi tegangan tinggi transformator,
2. Untuk mendapatkan nilai tegangan, arus, dan daya primer transformator, maka hubungkan alat pengukur voltmeter, amperemeter dan wattmeter dengan sisi primer transformator,
3. Pada sisi sekunder dihubungkan amperemeter secara seri untuk mengetahui arus sekunder yg muncul dan sisi sekunder di hubung singkatkan,
4. Sumber tegangan yang terhubung dengan sisi primer transformator dinaikkan perlahan hingga arus nominalnya, lalu dilihat nilai tegangan, arus, dan daya pada alat ukur,

5. Setelah arus sudah mencapai nominal transformator, pengujian hubung singkat sudah selesai, lalu langkah terakhir menghitung nilai dari parameter yang ingin didapatkan menggunakan rumus.

Setelah dilakukan beberapa langkah untuk melakukan pengujian hubung singkat maka didapatkan hasil parameter yang berbeda pada kedua transformator. Hasil yang didapatkan pada pengujian hubung singkat pada transformator E-I ditunjukkan tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Hasil pengujian hubung singkat transformator 1-fasa E-I

Data pengujian	Nilai
Tegangan Primer (V_{sc})	9 Volt
Arus Primer (I_{sc})	4,3 Ampere
Daya (P_{sc})	36,6 Watt

Dari hasil pengujian transformator 1-fasa E-I hubung singkat, dapat diketahui parameter kumparan pada rangkaian ekuivalen transformator, yaitu resistansi ekuivalen (R_{eq}) dan reaktansi ekuivalen (X_{eq}) melalui beberapa penyelesaian dengan rumus sebagai berikut.

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (3.5)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (3.6)$$

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)} \quad (3.7)$$

Dari rumus di atas dapat dilihat langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan nilai resistansi ekuivalen (R_{eq}). Lalu, dapat ditentukan nilai dari reaktansi ekuivalen (X_{eq}) dengan awalnya mencari nilai dari impedansi ekuivalen (Z_{eq}) transformator. Kemudian dari nilai impedansi ekuivalen transformator diperoleh nilai X_{eq} pada tabel 3.3 sebagai berikut.

Tabel 3.3 Hasil perhitungan parameter resistansi ekuivalen dan reaktansi ekuivalen transformator 1-fasa E-I

Data perhitungan	Nilai
Resistansi ekuivalen (R_{eq})	1,979448 Ω
Impedansi ekuivalen (Z_{eq})	2,093023 Ω
Reaktansi ekuivalen (X_{eq})	0,680096 Ω

Untuk transformator dengan potongan inti yang sudah dimodifikasi secara diagonal atau transformator E/E, hasil yang didapatkan pada pengujian hubung singkat pada transformator ini terdapat pada tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3.4 Hasil pengujian hubung singkat transformator 1-fasa E/E

Data pengujian	Nilai
Tegangan Primer (V_{sc})	9 Volt
Arus Primer (I_{sc})	4 Ampere
Daya (P_{sc})	34,5 Watt

Dari data pengujian pada tabel 3.8 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi ekivalen (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen (X_{eq}) melalui penyelesaian yang sama seperti pada transformator E-I. Kemudian dari penyelesaian dan perhitungan melalui rumus yang sama seperti yang digunakan pada transformator E-I didapatkan nilai R_{eq} dan X_{eq} pada transformator E/E yang ada pada tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Hasil perhitungan parameter resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen transformator 1-fasa E/E

Data perhitungan	Nilai
Resistansi ekivalen (R_{eq})	2,15625 Ω
Impedansi ekivalen (Z_{eq})	2,25 Ω
Reaktansi ekivalen (X_{eq})	0,642718 Ω

3.2.1.2 Pengujian Tanpa Beban (*open circuit test*)

Pengujian tanpa beban (*open circuit test*) dapat dilakukan dengan mengikuti rangkaian pengujian pada gambar 2.5 yang terdapat di bab sebelumnya. Langkah-langkah berikut yang harus dilakukan untuk pengujian tanpa beban (*open circuit test*) pada transformator:

1. Hubungkan sumber tegangan bolak balik pada sisi primer transformator atau dalam studi ini sisi tegangan tinggi transformator,
2. Untuk mendapatkan nilai tegangan, arus, dan daya primer transformator, maka hubungkan alat pengukur voltmeter, amperemeter dan wattmeter dengan sisi primer transformator. Sisi sekunder juga sebaiknya diukur tegangannya,
3. Sumber tegangan yang terhubung dengan sisi primer transformator dinaikkan perlahan hingga tegangan nominalnya, lalu dilihat nilai tegangan, arus, dan daya pada alat ukur,

4. Setelah tegangan sudah mencapai nominal transformator, pengujian tanpa beban sudah selesai, lalu langkah terakhir menghitung nilai dari parameter yang ingin didapatkan menggunakan rumus.

Setelah dilakukan beberapa langkah untuk melakukan pengujian tanpa beban maka didapatkan hasil parameter yang berbeda pada kedua transformator. Hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator E-I ditunjukkan pada tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3.6 Hasil pengujian tanpa beban transformator 1-fasa E-I

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)
0	0	0
10	0,027	0,1
20	0,0398	0,31
30	0,0478	0,68
40	0,0546	1,15
50	0,059	1,76
60	0,0639	2,42
70	0,0683	3,21
80	0,0737	4,07
90	0,0761	5,82
100	0,0793	5,68
110	0,0817	6,51
120	0,0858	7,37
130	0,0883	8,4
140	0,0919	8,83
150	0,094	11,2
160	0,0985	11,8
170	0,103	12,9
180	0,108	14,2
190	0,114	15,6
200	0,121	16,9

Tabel 3.6 Hasil pengujian tanpa beban transformator 1-fasa E-I (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)
210	0,13	18,4
220	0,145	20,1
230	0,166	22,3
240	0,189	24,8
250	0,219	27
260	0,254	30
270	0,295	33
280	0,34	37,5
290	0,388	42
300	0,448	47
310	0,507	52,1
320	0,576	57,8
330	0,653	62,8
340	0,73	67,9
350	0,819	72,9
360	0,918	100
370	1,02	116
380	1,15	129

Dari hasil pengujian transformator 1-fasa E-I tanpa beban, dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m) melalui beberapa penyelesaian dengan rumus sebagai berikut.

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (3.1)$$

$$S = V_{oc} * I_{oc} \quad (3.2)$$

$$Q_{oc} = \sqrt{(S^2 - P_{oc}^2)} \quad (3.3)$$

$$X_m = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} \quad (3.4)$$

Dari rumus di atas dapat dilihat langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan nilai resistansi inti (R_c). Lalu, dapat ditentukan nilai dari reaktansi magnetisasi (X_m) dengan awalnya mencari nilai dari daya semu transformator dan daya reaktif transformator. Kemudian dari nilai daya semu dan daya reaktif transformator diperoleh nilai X_m pada tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3.7 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E-I

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	Rc (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	Xm (Ω)
0	0	0	0	0	0	0
10	0,027	0,1	1000	0,27	0,2507	398,72 61
20	0,0398	0,31	1290,32	0,79	0,7331	545,58 74
30	0,0478	0,68	1323,52	1,43	1,2625	712,86 02
40	0,0546	1,15	1391,30	2,18	1,8567	861,74 13
50	0,059	1,76	1420,45	2,95	2,3674	1055,9 8
60	0,0639	2,42	1487,60	3,83	2,9737	1210,5
70	0,0683	3,21	1526,48	4,78	3,5431	1382,9 5
80	0,0737	4,07	1572,48	5,89	4,2659	1500,2 6
90	0,0761	5,82	1391,75	6,84	3,6105	2243,3 9
100	0,0793	5,68	1760,56	7,93	5,5337	1807,0 9
110	0,0817	6,51	1858,67	8,98 7	6,1956	1952,9 8
120	0,0858	7,37	1953,86	10,2 9	7,1896	2002,8 8

Tabel 3.7 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E-I (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	Rc (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	Xm (Ω)
130	0,0883	8,4	2011,90	11,47	7,8235	2160,1 5
140	0,0919	8,83	2219,70	12,86	9,3576	2094,5 5
150	0,094	11,2	2008,92	14,1	8,5656	2626,7 7
160	0,0985	11,8	2169,49	15,76	10,446	2450,4 9
170	0,103	12,9	2240,31	17,51	11,840	2440,8 4
180	0,108	14,2	2281,69	19,44	13,276	2440,3 4
190	0,114	15,6	2314,10	21,66	15,026	2402,4 2
200	0,121	16,9	2366,86	24,2	17,321	2309,2 8
210	0,13	18,4	2396,73	27,3	20,167	2186,6 8
220	0,145	20,1	2407,96	31,9	24,770	1953,9 0
230	0,166	22,3	2372,19	38,18	30,990	1706,9 6
240	0,189	24,8	2322,58	45,36	37,980	1516,5 8
250	0,219	27	2314,81	54,75	47,629	1312,2 1
260	0,254	30	2253,33	66,04	58,832	1149,0 2
270	0,295	33	2209,09	79,65	72,492	1005,6 2
280	0,34	37,5	2090,66	95,2	87,503 09	895,96
290	0,388	42	2002,38	112,5 2	104,38 75	805,65

Tabel 3.7 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E-I (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	Rc (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	Xm (Ω)
300	0,448	47	1914,89	134,4	125,91 41	714,77
310	0,507	52,1	1844,53	157,1 7	148,28 35	648,08
320	0,576	57,8	1771,62	184,3 2	175,02 29	585,06
330	0,653	62,8	1734,07	215,4 9	206,13 61	528,29
340	0,73	67,9	1702,50	248,2	238,73 17	484,22
350	0,819	72,9	1680,38	286,6 5	277,22 52	441,87
360	0,918	100	1296	330,4 8	314,98 73	411,44
370	1,02	116	1180,17	377,4	359,13 06	381,19
380	1,15	129	1119,38	437	417,52 6	345,84

Untuk transformator dengan potongan inti yang sudah dimodifikasi secara diagonal atau transformator E/E, hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator ini terdapat pada tabel 3.8 sebagai berikut.

Tabel 3.8 Hasil pengujian tanpa beban transformator 1-fasa E/E

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)
0	0	0
10	0,027	0,1
20	0,0398	0,31
30	0,0478	0,68
40	0,0546	1,15
50	0,059	1,76

Tabel 3.8 Hasil pengujian tanpa beban transformator 1- fasa E/E (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)
60	0,0639	2,42
70	0,0683	3,21
80	0,0737	4,07
90	0,0761	5,82
100	0,0793	5,68
110	0,0817	6,51
120	0,0858	7,37
130	0,0883	8,4
140	0,0919	8,83
150	0,094	11,2
160	0,0985	11,8
170	0,103	12,9
180	0,108	14,2
190	0,114	15,6
200	0,121	16,9
210	0,13	18,4
220	0,145	20,1
230	0,166	22,3
240	0,189	24,8
250	0,219	27
260	0,254	30
270	0,295	33
280	0,34	37,5
290	0,388	42
300	0,448	47
310	0,507	52,1
320	0,576	57,8

Tabel 3.8 Hasil pengujian tanpa beban transformator 1-fasa E/E (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)
330	0,653	62,8
340	0,73	67,9
350	0,819	72,9
360	0,918	100
370	1,02	116
380	1,15	129

Dari data pengujian pada tabel 3.8 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m) melalui penyelesaian yang sama seperti pada transformator E-I. Kemudian dari penyelesaian dan perhitungan melalui rumus yang sama seperti yang digunakan pada transformator E-I didapatkan beberapa nilai R_c dan X_m pada transformator E/E yang ada pada tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E/E

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	R_c (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	X_m (Ω)
0	0	0	0	0	0	0
10	0,027	0,1	1000	0,27	0,25079	398,72
20	0,0398	0,31	$1290,3_2$	0,796	0,73315	545,58
30	0,0478	0,68	$1323,5_2$	1,434	1,26251	712,86
40	0,0546	1,15	$1391,3_0$	2,184	1,85670	861,74
50	0,059	1,76	$1420,4_5$	2,95	2,36746	$1055,9_8$
60	0,0639	2,42	$1487,6_0$	3,83	2,97374	$1210,5_9$
70	0,0683	3,21	$1526,4_7$	4,78	3,54314	$1382,9_5$
80	0,0737	4,07	1572,5	5,89	4,26590	1500,3

Tabel 3.9 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E/E (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	Rc (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	Xm (Ω)
90	0,0761	5,82	1391,7 5	6,84	3,61059	2243,3 9
100	0,0793	5,68	1760,5 6	7,93	5,53376	1807,0 8
110	0,0817	6,51	1858,6 7	8,98	6,19564	1952,9 8
120	0,0858	7,37	1953,8 6	1029	7,18962	2002,8 8
130	0,0883	8,4	2011,9 0	11,47	7,82351	2160,1 5
140	0,0919	8,83	2219,7 0	12,86	9,35762	2094,5 4
150	0,094	11,2	2008,9 2	14,1	8,56562	2626,7 7
160	0,0985	11,8	2169,4 9	15,76	10,4468	2450,4 8
170	0,103	12,9	2240,3 1	17,51	11,8401	2440,8 3
180	0,108	14,2	2281,6 9	19,44	13,2768	2440,3 4
190	0,114	15,6	2314,1 0	21,66	15,0264	2402,4 2
200	0,121	16,9	2366,8 6	24,2	17,3213	2309,2 8
210	0,13	18,4	2396,7 3	27,3	20,1675	2186,6 8
220	0,145	20,1	2407,9 6	31,9	24,7709	1953,9 0
230	0,166	22,3	2372,1 9	38,18	30,9906	1706,9 6
240	0,189	24,8	2322,5 8	45,36	37,9801	1516,5 8
250	0,219	27	2314,8 1	54,75	47,6294	1312,2 1

Tabel 3.9 Hasil perhitungan parameter resistansi inti dan reaktansi magnetisasi transformator 1-fasa E/E (lanjutan)

Tegangan (Voc)	Arus (Ioc)	Daya (Poc)	Rc (Ω)	S (VA)	Qoc (VAR)	Xm (Ω)
260	0,254	30	2253,3 3	66,04	58,8326	1149,0 2
270	0,295	33	2209,0 9	79,65	72,4922	1005,6 2
280	0,34	37,5	2090,6 6	95,2	87,5030	895,96
290	0,388	42	2002,3 8	112,5 2	104,387	805,65
300	0,448	47	1914,8 9	134,4	125,914	714,77
310	0,507	52,1	1844,5 2	157,1 7	148,283	648,08
320	0,576	57,8	1771,6 2	184,3 2	175,022	585,06
330	0,653	62,8	1734,0 7	215,4 9	206,136	528,29
340	0,73	67,9	1702,5 0	248,2	238,731	484,22
350	0,819	72,9	1680,3 8	286,6 5	277,225	441,87
360	0,918	100	1296	330,4 8	314,987	411,44
370	1,02	116	1180,1 7	377,4	359,130	381,19
380	1,15	129	1119,3 7	437	417,526	345,84

3.2.1.3 Pengujian Sumber DC (*DC Test*)

Pengujian sumber DC (*DC test*) dapat dilakukan dengan mengikuti rangkaian pengujian pada gambar 2.6 yang terdapat di bab sebelumnya. Langkah-langkah berikut yang harus dilakukan untuk pengujian sumber DC (*DC test*) pada transformator:

1. Hubungkan sumber tegangan searah pada sisi primer transformator dan sisi sekunder transformator,

2. Untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus maka hubungkan alat pengukur voltmeter dan amperemeter dengan sisi primer dan sisi sekunder transformator,
3. Pada sisi sekunder tidak dihubungkan apapun sehingga dalam kondisi *open circuit*,
4. Sumber tegangan yang terhubung dengan sisi primer transformator dinaikkan perlahan hingga tegangan nominalnya, lalu dilihat nilai tegangan dan arusnya pada alat ukur,
5. Setelah tegangan sudah mencapai nominal transformator, pengujian sumber DC sudah selesai, lalu langkah terakhir menghitung nilai dari parameter yang ingin didapatkan menggunakan rumus.

Setelah dilakukan beberapa langkah untuk melakukan pengujian sumber DC maka didapatkan hasil parameter yang berbeda pada kedua transformator. Hasil yang didapatkan pada pengujian sumber DC pada transformator E-I ditunjukkan pada tabel 3.10 sebagai berikut.

Tabel 3.10 Hasil pengujian sumber DC transformator 1-fasa E-I

Data pengujian	Nilai		
Tegangan Primer (Vp)	1 Volt	3 Volt	6 Volt
Arus Primer (Ip)	0,85 A	2,31 A	4,85 A
Tegangan Sekunder (Vs)	0,5 Volt	1 Volt	1,5 Volt
Arus Sekunder (Is)	1,62 A	3,11 A	4,66 A

Dari hasil pengujian transformator 1-fasa E-I sumber DC, dapat diketahui parameter kumparan primer dan sekunder transformator, yaitu resistansi primer (R_p) dan resistansi sekunder (R_s) melalui beberapa penyelesaian dengan rumus sebagai berikut.

$$R_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (3.8)$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (3.9)$$

$$X_p \text{ dan } X_s = \frac{X_{eq}}{2} \quad (3.10)$$

Dari rumus di atas dapat dilihat nilai resistansi primer (R_p) dan nilai resistansi sekunder (R_s) memiliki penyelesaian yang sama. Sedangkan untuk nilai reaktansi primer (X_p) dan reaktansi sekunder (X_s)

transformator dalam studi ini digunakan rumus yang ada pada persamaan 3.10. Kemudian hasil dari perhitungan terdapat pada tabel 3.11 sebagai berikut. Nilai resistansi sekunder harus diubah dalam bentuk primer dengan persamaan 3.11 berikut.

$$R_p = R_s * \left(\frac{255}{147}\right)^2 \quad (3.11)$$

Tabel 3.11 Hasil perhitungan parameter resistansi primer, resistansi sekunder, reaktansi primer dan reaktansi sekunder transformator 1-fasa E-I

Data perhitungan	Nilai
Resistansi Primer Perhitungan (R_p)	1,45121 Ω
Resistansi Sekunder Perhitungan (R_s)	0,335464 Ω
Resistansi Sekunder Setelah Menjadi Primer (R_p)	1,009465 Ω
Reaktansi primer dan sekunder (X_p dan X_s)	0,340048 Ω

Untuk transformator dengan potongan inti yang sudah dimodifikasi secara diagonal atau transformator E/E, hasil yang didapatkan pada pengujian sumber DC pada transformator ini terdapat pada tabel 3.12 sebagai berikut.

Tabel 3.12 Hasil pengujian sumber DC transformator 1-fasa E/E

Data pengujian	Nilai		
Tegangan Primer (V_p)	1 Volt	3 Volt	6 Volt
Arus Primer (I_p)	0,85 A	2,31 A	4,85 A
Tegangan Sekunder (V_s)	0,5 Volt	1 Volt	1,5 Volt
Arus Sekunder (I_s)	1,62 A	3,11 A	4,66 A

Dari data pengujian pada tabel 3.8 dapat diketahui parameter kumparan transformator, yaitu resistansi primer (R_p) dan resistansi sekunder (R_s) melalui penyelesaian yang sama seperti pada transformator E-I. Kemudian dari penyelesaian dan perhitungan melalui rumus yang sama seperti yang digunakan pada transformator E-I

didapatkan nilai R_p , R_s , X_p dan X_s pada transformator E/E yang ada pada tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.13 Hasil perhitungan parameter resistansi primer, resistansi sekunder, reaktansi primer dan reaktansi sekunder transformator 1-fasa E/E

Data perhitungan	Nilai
Resistansi Primer Perhitungan (R_p)	1,237309 Ω
Resistansi Sekunder Perhitungan (R_s)	0,317358 Ω
Resistansi Sekunder Setelah Menjadi Primer (R_p)	0,954982 Ω
Reaktansi primer dan sekunder (X_p dan X_s)	0,321359 Ω

3.2.2 Kurva Parameter Transformator

Pada transformator terdapat dua kurva yang dapat menjadi salah satu parameter untuk menentukan arus *inrush* pada pemodelan di *simulink*. Pemodelan dinamis ini merupakan pemodelan non-linear dari transformator 1-fasa dua belitan maka dari itu dibutuhkan kurva untuk menentukan karakteristik dari transformator yang diuji dan dapat menentukan nilai saturasi dari transformator yang diuji. Terdapat dua kurva yang dibutuhkan yaitu kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi dan kurva instantaneous $\Delta\Psi$ vs Ψ sat (kurva delta fluks vs kurva fluks saturasi). Nilai atau parameter pada kedua kurva tersebut didapatkan dari pengujian parameter *open circuit test* pada sisi sekunder yang kemudian ditransformasikan ke bentuk primer menggunakan rumus 3.12 dan 3.13 lalu parameter arus primer dan tegangan primer yang didapatkan, dimasukkan ke dalam perangkat lunak MATLAB yang ada pada gambar 3.6. Hasil *open circuit test* sekunder ada pada tabel 3.14 dan 3.15.

$$V_p = V_s * \left(\frac{255}{147}\right) \quad (3.12)$$

$$I_p = I_s / \left(\frac{255}{147}\right) \quad (3.13)$$

Tabel 3.14 Hasil *open circuit test* transformator 1-fasa E-I pada sisi sekunder

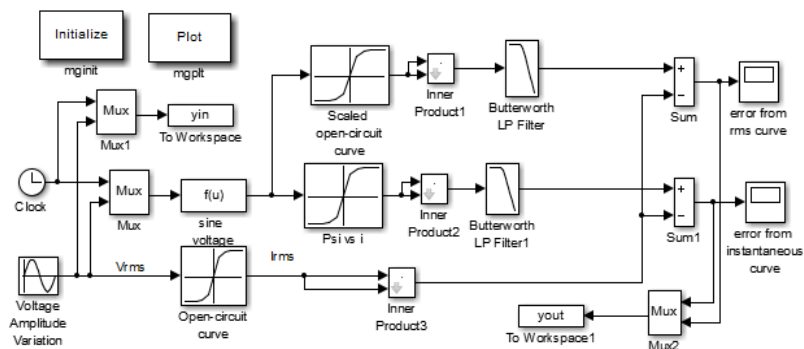
Voc sekunder (V)	Ioc sekunder (A)	V primer (V)	I primer (A)
17	0,0823	29,4898	0,047444
27	0,097	46,83673	0,055918
37	0,109	64,18367	0,062835
47	0,118	81,53061	0,068024
57	0,127	98,87755	0,073212
67	0,136	116,2245	0,0784
77	0,146	133,5714	0,084165
87	0,157	150,9184	0,090506
97	0,17	168,2653	0,098
107	0,188	185,6122	0,108376
117	0,213	202,9592	0,122788
127	0,255	220,3061	0,147
137	0,318	237,6531	0,183318
147	0,41	255	0,236353
157	0,523	272,3469	0,301494
167	0,69	289,6939	0,397765
177	0,84	307,0408	0,484235
187	1,06	324,3878	0,611059
197	1,31	341,7347	0,755176
207	1,6	359,0816	0,922353
217	1,92	376,4286	1,106824

Tabel 3.15 Hasil *open circuit test* transformator 1-fasa E/E pada sisi sekunder

Voc sekunder (V)	Ioc sekunder (A)	V primer (V)	I primer (A)
17	0,211	29,4898	0,121635
27	0,283	46,83673	0,163141
37	0,36	64,18367	0,207529
47	0,445	81,53061	0,256529

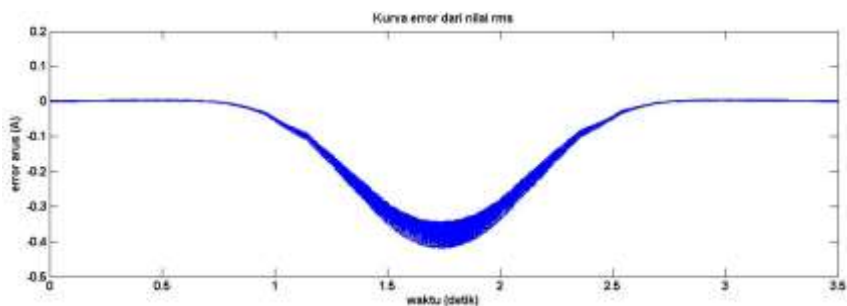
Tabel 3.15 Hasil *open circuit test* transformator 1-fasa E/E pada sisi sekunder (lanjutan)

Voc sekunder (V)	Ioc sekunder (A)	V primer (V)	I primer (A)
57	0,522	98,87755	0,300918
67	0,613	116,2245	0,353376
77	0,697	133,5714	0,4018
87	0,789	150,9184	0,454835
97	0,877	168,2653	0,505565
107	0,975	185,6122	0,562059
117	1,07	202,9592	0,616824
127	1,18	220,3061	0,680235
137	1,29	237,6531	0,743647
147	1,41	255	0,812824
157	1,54	272,3469	0,887765
167	1,67	289,6939	0,962706
177	1,82	307,0408	1,049176
187	2	324,3878	1,152941
197	2,19	341,7347	1,262471
207	2,43	359,0816	1,400824
217	2,77	376,4286	1,596824

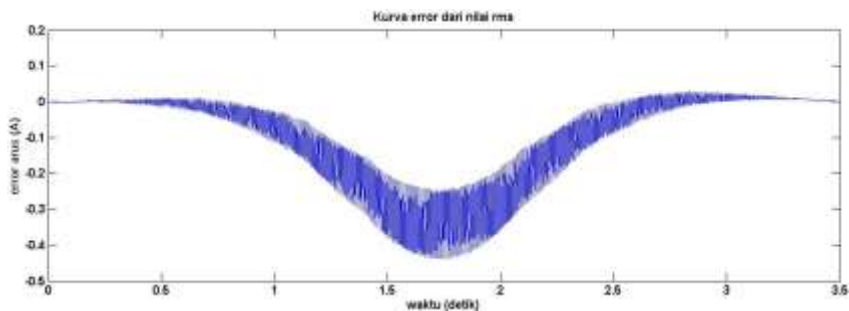


Gambar 3.6 Blok diagram menentukan kurva pada transformator

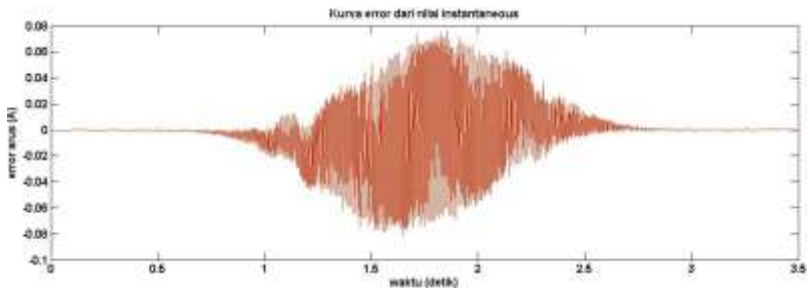
Dari simulasi MATLAB tersebut didapatkan parameter yang dapat mendukung terbentuknya kurva dari transformator terutama kurva magnetisasi transformator yang dapat menunjukkan karakteristik inti dari transformator 1-fasa yang diuji. Beberapa parameter yang didapatkan yaitu nilai fluks transformator dan nilai arus dari transformator yang diuji. Selain mendapatkan parameter transformator dari simulasi ini didapatkan juga nilai error pada kurva rms dan kurva instanteneous yang ada pada transformator 1-fasa dengan cara potong normal E-I dan transformator 1-fasa dengan cara potong modifikasi diagonal E/E seperti pada gambar 3.7 sampai gambar 3.10. Nilai error pada kurva ini berfungsi untuk membuktikan parameter yang didapatkan saat pengujian tanpa beban (*open circuit test*) transformator sebelumnya lebih banyak errornya atau tidak, sehingga dapat membuat data kurva yang dihasilkan menjadi lebih valid.



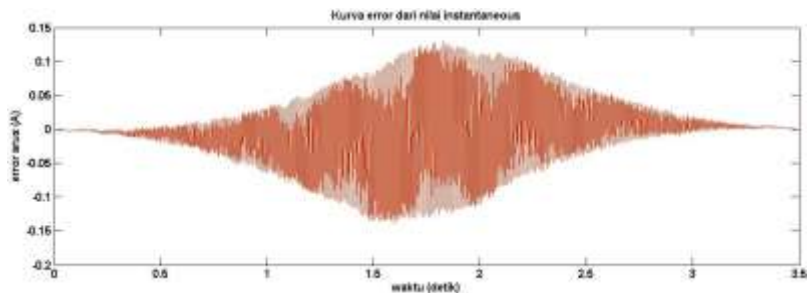
Gambar 3.7 Kurva error rms pada transformator E-I



Gambar 3.8 Kurva error rms pada transformator E/E



Gambar 3.9 Kurva error instantaneous pada transformator E-I



Gambar 3.10 Kurva error instantaneous pada transformator E/E

Dari kurva tersebut terlihat nilai error pada pembentukan kurva sangat kecil baik di transformator E-I dan transformator E/E tetapi tetap masih ada nilai error sehingga kurva yang dibentuk tidak sepenuhnya sesuai dengan keadaan riil transformator. Kurva error pada pengujian *open circuit test* di sisi sekunder lebih kecil dibandingkan pengujian *open circuit test* di sisi primer, sehingga dipilih parameter sisi sekunder. Hasil dari simulasi yang dapat menentukan parameter pembuatan kurva dapat dilihat di tabel 3.16 dan tabel 3.17.

Tabel 3.16 Hasil simulasi transformator 1-fasa E-I

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus (A)
0	0	0	0
29,4898	0,047444	41,70487	0,067095
64,18367	0,062835	90,76942	0,072565
81,53061	0,068024	115,3017	0,081155

Tabel 3.16 Hasil simulasi transformator 1-fasa E-I (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus (A)
98,87755	0,073212	139,834	0,088038
116,2245	0,0784	164,3662	0,0956
133,5714	0,084165	188,8985	0,10515
150,9184	0,090506	213,4308	0,11551
168,2653	0,098	237,9631	0,129232
185,6122	0,108376	262,4954	0,151542
202,9592	0,122788	287,0276	0,182262
220,3061	0,147	311,5599	0,241249
237,6531	0,183318	336,0922	0,320924
255	0,236353	359,3218	0,436585
272,3469	0,301494	373,7465	0,560522
289,6939	0,397765	421,689	0,778
307,0408	0,484235	434,2213	0,882964
324,3878	0,611059	462,7536	1,187283
341,7347	0,755176	483,2858	1,439155
359,0816	0,922353	507,8181	1,765237
376,4286	1,106824	532,3504	2,095586

Tabel 3.17 Hasil simulasi transformator 1-fasa E/E

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus (A)
0	0	0	0
29,4898	0,121635	54,70487	0,172018
64,18367	0,207529	90,76942	0,272642
81,53061	0,256529	115,3017	0,356227
98,87755	0,300918	135,834	0,408719
116,2245	0,353376	164,3662	0,499905
133,5714	0,4018	183,8985	0,557236
150,9184	0,454835	213,4308	0,645213

Tabel 3.17 Hasil simulasi transformator 1-fasa E/E (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus (A)
168,2653	0,505565	232,9631	0,709211
185,6122	0,562059	262,4954	0,805656
202,9592	0,616824	287,0276	0,876305
220,3061	0,680235	320,5599	0,99263
237,6531	0,743647	341,0922	1,079793
255	0,812824	365,6245	1,198976
272,3469	0,887765	389,1567	1,322322
289,6939	0,962706	409,689	1,430941
307,0408	1,049176	434,2213	1,595487
324,3878	1,152941	461,7536	1,80002
341,7347	1,262471	483,2858	1,979391
359,0816	1,400824	507,8181	2,28511
376,4286	1,596824	532,3504	2,75913

3.2.2.1 Kurva *Instantaneous Fluks vs Arus Magnetisasi*

Kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi adalah kurva yang mendefinisikan hubungan antara nilai arus magnetisasi dan nilai fluks pada transformator. Nilai tersebut didapatkan dari pengujian parameter *open circuit test* lalu parameter yang didapatkan dari pengujian *open circuit test* yaitu parameter arus primer dan tegangan primer yang didapatkan, dimasukkan ke dalam perangkat lunak MATLAB yang ada pada subbab sebelumnya. Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator 1-fasa dengan cara potong normal E-I dapat dilihat pada tabel 3.18 sebagai berikut.

Tabel 3.18 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E-I

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
-376,429	-1,10682	-532,35	-1302,57
-359,082	-0,92235	-507,818	-1097,24
-341,735	-0,75518	-483,286	-894,55

Tabel 3.18 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E-I (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
-324,388	-0,61106	-462,754	-737,991
-307,041	-0,48424	-434,221	-548,833
-289,694	-0,39776	-421,689	-483,589
-272,347	-0,30149	-373,747	-385,157
-255	-0,23635	-359,322	-360,624
-237,653	-0,18332	-336,092	-336,092
-220,306	-0,147	-311,56	-311,56
-202,959	-0,12279	-287,028	-287,028
-185,612	-0,10838	-262,495	-262,495
-168,265	-0,098	-237,963	-237,963
-150,918	-0,09051	-213,431	-213,431
-133,571	-0,08416	-188,899	-188,899
-116,224	-0,0784	-164,366	-164,366
-98,8776	-0,07321	-139,834	-139,834
-81,5306	-0,06802	-115,302	-115,302
-64,1837	-0,06284	-90,7694	-90,7694
-29,4898	-0,04744	-41,7049	-41,7049
0	0	0	0
29,4898	0,047444	41,70487	41,70487
64,18367	0,062835	90,76942	90,76942
81,53061	0,068024	115,3017	115,3017
98,87755	0,073212	139,834	139,834
116,2245	0,0784	164,3662	164,3662
133,5714	0,084165	188,8985	188,8985
150,9184	0,090506	213,4308	213,4308
168,2653	0,098	237,9631	237,9631
185,6122	0,108376	262,4954	262,4954

Tabel 3.18 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E-I (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
202,9592	0,122788	287,0276	287,0276
220,3061	0,147	311,5599	311,5599
237,6531	0,183318	336,0922	336,0922
255	0,236353	359,3218	360,6245
272,3469	0,301494	373,7465	385,1567
289,6939	0,397765	421,689	483,589
307,0408	0,484235	434,2213	548,8327
324,3878	0,611059	462,7536	737,9915
341,7347	0,755176	483,2858	894,5499
359,0816	0,922353	507,8181	1097,236
376,4286	1,106824	532,3504	1302,574

Sedangkan, untuk hasil perhitungan nilai arus magnetisasi transformator 1-fasa dengan cara potong modifikasi atau cara potong diagonal E/E dapat dilihat pada tabel 3.19 sebagai berikut.

Tabel 3.19 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E/E

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
-376,429	-1,59682	-532,35	-898,345
-359,082	-1,40082	-507,818	-744,009
-341,735	-1,26247	-483,286	-644,47
-324,388	-1,15294	-461,754	-586,069
-307,041	-1,04918	-434,221	-519,475
-289,694	-0,96271	-409,689	-465,9
-272,347	-0,88776	-389,157	-430,535
-255	-0,81282	-365,624	-390,375
-237,653	-0,74365	-341,092	-351,57

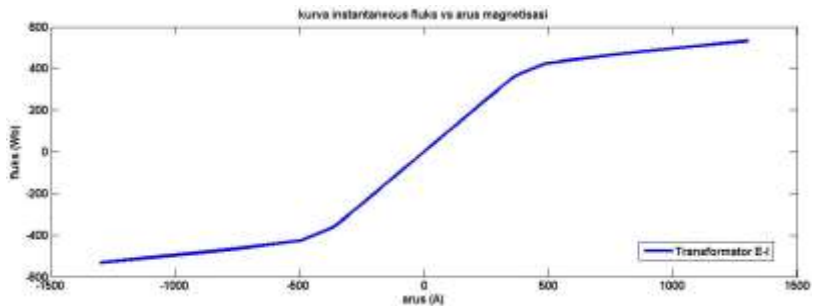
Tabel 3.19 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E/E (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
-220,306	-0,68024	-320,56	-323,191
-202,959	-0,61682	-287,028	-287,028
-185,612	-0,56206	-262,495	-262,495
-168,265	-0,50556	-232,963	-232,963
-150,918	-0,45484	-213,431	-213,431
-133,571	-0,4018	-183,899	-183,899
-116,224	-0,35338	-164,366	-164,366
-98,8776	-0,30092	-135,834	-135,834
-81,5306	-0,25653	-115,302	-115,302
-64,1837	-0,20753	-90,7694	-90,7694
-29,4898	-0,12164	-54,7049	-54,7049
0	0	0	0
29,4898	0,121635	54,70487	54,70487
64,18367	0,207529	90,76942	90,76942
81,53061	0,256529	115,3017	115,3017
98,87755	0,300918	135,834	135,834
116,2245	0,353376	164,3662	164,3662
133,5714	0,4018	183,8985	183,8985
150,9184	0,454835	213,4308	213,4308
168,2653	0,505565	232,9631	232,9631
185,6122	0,562059	262,4954	262,4954
202,9592	0,616824	287,0276	287,0276
220,3061	0,680235	320,5599	323,1905
237,6531	0,743647	341,0922	351,5698
255	0,812824	365,6245	390,3746
272,3469	0,887765	389,1567	430,5348
289,6939	0,962706	409,689	465,9001

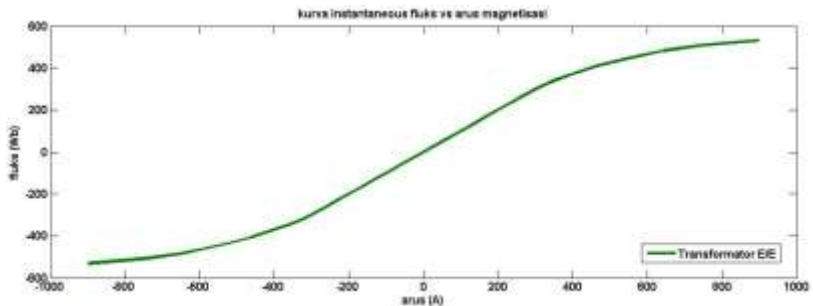
Tabel 3.19 Hasil perhitungan nilai arus magnetisasi untuk transformator E/E (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Arus Magnetisasi (A)
307,0408	1,049176	434,2213	519,4746
324,3878	1,152941	461,7536	586,0686
341,7347	1,262471	483,2858	644,47
359,0816	1,400824	507,8181	744,0089
376,4286	1,596824	532,3504	898,3451

Setelah didapatkan nilai arus primer, kemudian diperoleh arus magnetisasi melalui simulasi MATLAB pada subbab sebelumnya. Setelah didapatkan nilai fluks dan arus magnetisasi dapat diplot pada kurva seperti pada gambar 3.11 dan gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3.11 Kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi pada transformator E-I



Gambar 3.12 Kurva instantaneous fluks vs arus magnetisasi pada transformator E/E

3.2.2.2 Kurva *Instantaneous Delta Fluks* ($\Delta\psi$) vs *Fluks Saturasi* (ψ_{sat})

Setelah didapatkan nilai tegangan primer (V_p), fluks saturasi transformator (ψ_{sat}) dan arus magnetisasi (I_m), kemudian didapatkan nilai selisih antara fluks transformator dan arus magnetisasi yang didefinisikan sebagai delta fluks ($\Delta\psi$). Setelah mendapatkan parameter tersebut didapatkan kurva instataneous delta fluks vs fluks saturasi untuk transformator tersebut. Hasil dari perhitungan delta fluks dapat dilihat pada tabel 3.20 dan tabel 3.21 sebagai berikut.

Tabel 3.20 Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E-I

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Delta Fluks
-376,429	-1,10682	-532,35	-770,224
-359,082	-0,92235	-507,818	-589,418
-341,735	-0,75518	-483,286	-411,264
-324,388	-0,61106	-462,754	-275,238
-307,041	-0,48424	-434,221	-114,611
-289,694	-0,39776	-421,689	-61,9
-272,347	-0,30149	-373,747	-11,4102
-255	-0,23635	-359,322	-1,30262
-237,653	-0,18332	-336,092	0
-220,306	-0,147	-311,56	0
-202,959	-0,12279	-287,028	0
-185,612	-0,10838	-262,495	0
-168,265	-0,098	-237,963	0
-150,918	-0,09051	-213,431	0
-133,571	-0,08416	-188,899	0
-116,224	-0,0784	-164,366	0
-98,8776	-0,07321	-139,834	0
-81,5306	-0,06802	-115,302	0
-64,1837	-0,06284	-90,7694	0
-29,4898	-0,04744	-41,7049	0

Tabel 3.20 Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E-I (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Delta Fluks
0	0	0	0
29,4898	0,047444	41,70487	0
64,18367	0,062835	90,76942	0
81,53061	0,068024	115,3017	0
98,87755	0,073212	139,834	0
116,2245	0,0784	164,3662	0
133,5714	0,084165	188,8985	0
150,9184	0,090506	213,4308	0
168,2653	0,098	237,9631	0
185,6122	0,108376	262,4954	0
202,9592	0,122788	287,0276	0
220,3061	0,147	311,5599	0
237,6531	0,183318	336,0922	0
255	0,236353	359,3218	1,30262
272,3469	0,301494	373,7465	11,4102
289,6939	0,397765	421,689	61,90001
307,0408	0,484235	434,2213	114,6114
324,3878	0,611059	462,7536	275,2379
341,7347	0,755176	483,2858	411,2641
359,0816	0,922353	507,8181	589,418
376,4286	1,106824	532,3504	770,2239

Tabel 3.21 Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E/E

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Delta Fluks
-376,429	-1,59682	-532,35	-365,995
-359,082	-1,40082	-507,818	-236,191
-341,735	-1,26247	-483,286	-161,184

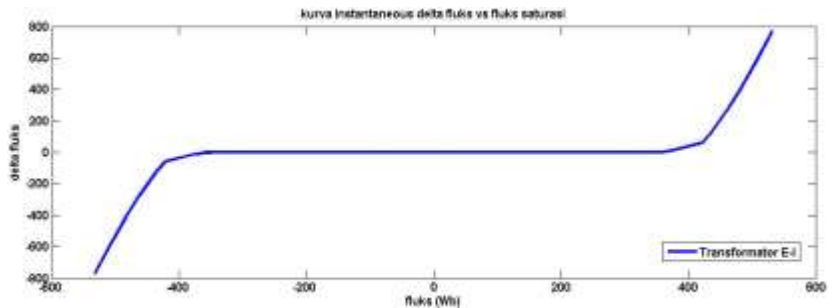
Tabel 3.21 Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E/E (lanjutan)

Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Delta Fluks
-324,388	-1,15294	-461,754	-124,315
-307,041	-1,04918	-434,221	-85,2533
-289,694	-0,96271	-409,689	-56,2111
-272,347	-0,88776	-389,157	-41,3781
-255	-0,81282	-365,624	-24,7501
-237,653	-0,74365	-341,092	-10,4776
-220,306	-0,68024	-320,56	-2,63059
-202,959	-0,61682	-287,028	0
-185,612	-0,56206	-262,495	0
-168,265	-0,50556	-232,963	0
-150,918	-0,45484	-213,431	0
-133,571	-0,4018	-183,899	0
-116,224	-0,35338	-164,366	0
-98,8776	-0,30092	-135,834	0
-81,5306	-0,25653	-115,302	0
-64,1837	-0,20753	-90,7694	0
-29,4898	-0,12164	-54,7049	0
0	0	0	0
29,4898	0,121635	54,70487	0
64,18367	0,207529	90,76942	0
81,53061	0,256529	115,3017	0
98,87755	0,300918	135,834	0
116,2245	0,353376	164,3662	0
133,5714	0,4018	183,8985	0
150,9184	0,454835	213,4308	0
168,2653	0,505565	232,9631	0
185,6122	0,562059	262,4954	0

Tabel 3.21 Nilai delta fluks pada transformator dengan cara potong E/E (lanjutan)

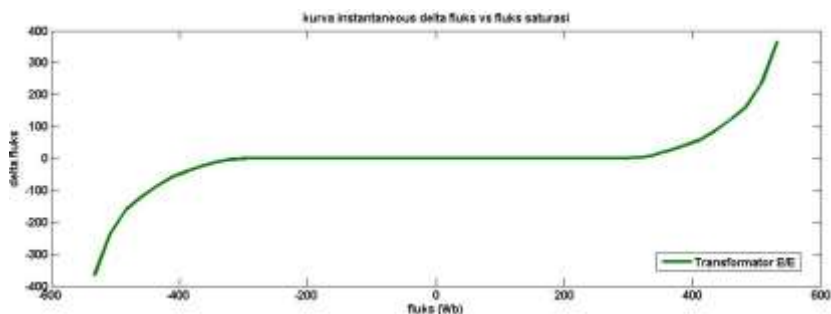
Tegangan primer (V)	Arus primer (A)	Fluks (Wb)	Delta Fluks
202,9592	0,616824	287,0276	0
220,3061	0,680235	320,5599	2,630594
237,6531	0,743647	341,0922	10,47761
255	0,812824	365,6245	24,75015
272,3469	0,887765	389,1567	41,37807
289,6939	0,962706	409,689	56,21111
307,0408	1,049176	434,2213	85,25334
324,3878	1,152941	461,7536	124,315
341,7347	1,262471	483,2858	161,1842
359,0816	1,400824	507,8181	236,1908
376,4286	1,596824	532,3504	365,9947

Dari hasil pada tabel 3.20 dan tabel 3.21 dapat terlihat bahwa transformator E-I lebih cepat mengalami saturasi daripada transformator E/E. Setelah itu dari tabel 3.20 didapatkan kurva transformator dengan cara potong E-I dapat dilihat pada gambar 3.13 berikut ini.



Gambar 3.13 Kurva instantaneous delta fluks vs fluks saturasi pada transformator E-I

Dari hasil kurva pun juga terlihat tranformator cara potong E-I lebih cepat saturasi. Dari tabel 3.21, didapatkan kurva transformator dengan cara potong E/E dapat dilihat pada gambar 3.14 berikut ini.



Gambar 3.14 Kurva instantaneous delta fluks vs fluks saturasi pada transformator E/E

3.2.3 Simulasi *SIMULINK* pada Perangkat Lunak MATLAB

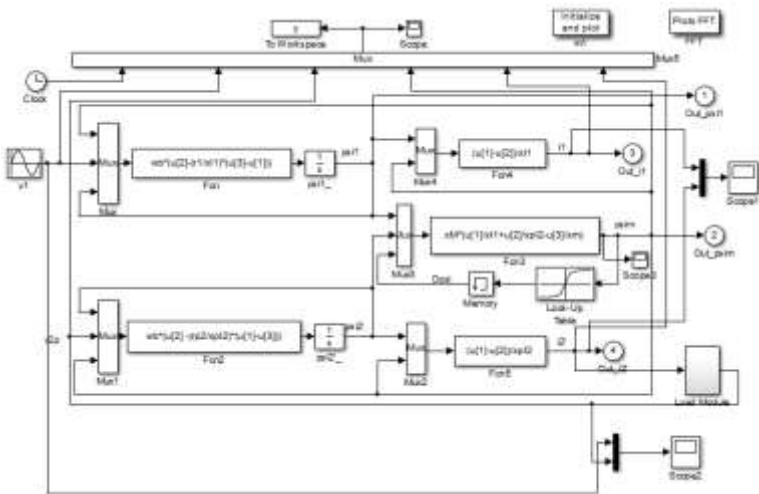
Hasil yang didapatkan dari pengujian dan pembentukan kurva pada transformator berupa parameter-parameter yang dapat menunjang berjalannya simulasi pemodelan transformator 1-fasa dua belitan. Parameter yang harus dimasukkan untuk mendapatkan hasil dari pemodelan pada *simulink* ditunjukkan pada tabel 3.22. Setelah semua parameter dimasukkan ke dalam *script* di perangkat lunak MATLAB, *run* blok diagram pada *simulink* untuk mendapatkan hasilnya. Pembentukan blok diagram pada *simulink* menggunakan persamaan-persamaan yang terdapat di bab sebelumnya. Hasil dari pemodelan tersebut berupa nilai arus *inrush* yang dapat dilihat di *scope*. Blok diagram pemodelan transformator 1-fasa dua belitan ditunjukkan pada gambar 3.15.

Tabel 3.22 Parameter yang dibutuhkan

Parameter Transformer	Keterangan
Vrated	Tegangan <i>rating</i> rms transformator
Srated	Daya aktif <i>rating</i> transformator
Frated	Frekuensi <i>rating</i> transformator (Hz)
Zb	Impedansi <i>base</i> sisi primer
wb	Frekuensi <i>base</i>
Vpk	Tegangan <i>rating</i> puncak

Tabel 3.22 Parameter yang dibutuhkan (lanjutan)

Parameter Transformer	Keterangan
NpbyNs	Rasio kumparan transformator
r1	Resistansi kumparan primer
rp2	Resistansi kumparan sekunder
x11	Reaktansi bocor kumparan primer
x12	Reaktansi bocor kumparan sekunder
xm	Reaktansi magnetisasi unsaturasi

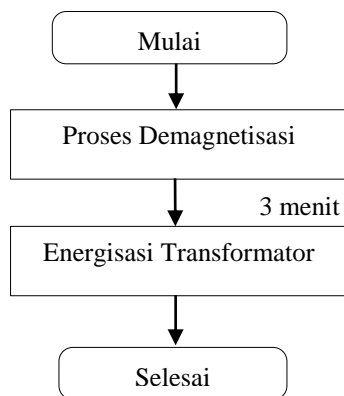


Gambar 3.15 Blok diagram pemodelan transformator 1-fasa dua belitan dengan simulink

3.3 Eksperimen Pengukuran Arus *Inrush*

Eksperimen yang dilakukan pada transformator adalah eksperimen pengukuran arus *inrush* yang dalam penelitian tugas akhir ini menggunakan beberapa perangkat pengukuran dan perangkat keras lainnya. Eksperimen pengukuran arus *inrush* pada transformator 1-fasa

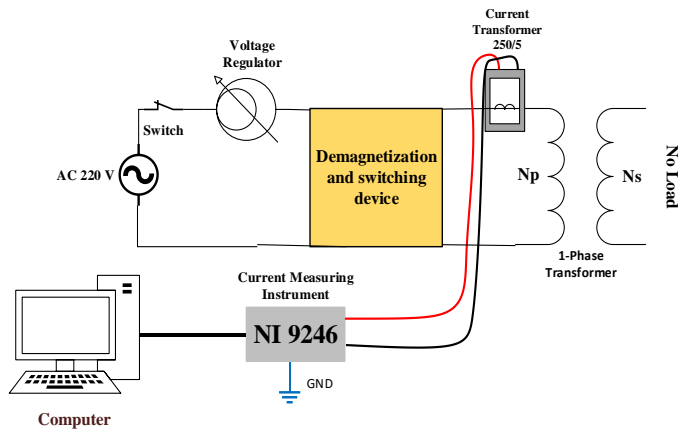
ini dilakukan berbasis laboratorium. Proses pengukuran arus *inrush* dalam penelitian tugas akhir ini dibagi menjadi dua tahap besar ditunjukkan pada gambar 3.16. Tahap yang paling penting adalah tahap pengukuran dan tahap yang menentukan parameter pembanding yaitu tahap demagnetisasi. Pada tahap pengukuran, akan diperoleh nilai dan bentuk dari arus *inrush* yang terdapat pada transformator. Sedangkan tahap demagnetisasi dilakukan untuk dijadikan parameter pembanding pada transformator yang diuji. Tahap demagnetisasi dilakukan agar didapatkan nilai arus *inrush* yang hampir mendekati nilainya saat disimulasikan. Tahap demagnetisasi pada penelitian tugas akhir menggunakan kapasitor. Pengukuran lanjut dilakukan setelah demagnetisasi selesai untuk mengetahui pengaruh demagnetisasi terhadap arus *inrush*.



Gambar 3.16 Skema eksperimen arus *inrush*

3.3.1 Alat Yang Digunakan Untuk Pengukuran

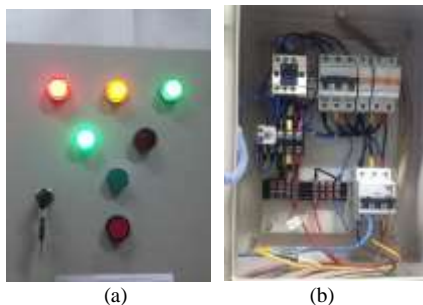
Alat yang digunakan untuk pengukuran arus *inrush* yang berbasis pada laboratorium menggunakan rangkaian seperti pada gambar 3.17. Berdasarkan rangkaian pada gambar 3.17, alat yang digunakan terdiri dari transformator 1-fasa 1 kVA, sumber AC 3-fasa, kapasitor demagnetisasi, komponen pensaklaran, alat pengambilan data, yakni DAQ 9246 dan sumber DC. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah perangkat lunak *LabVIEW* sebagai *human interface* pada proses akuisisi data.



Gambar 3.17 Rangkaian pengukuran arus *inrush* dan demagnetisasi transformator 1-fasa

3.3.1.1 Sumber 1-Fasa

Sumber yang digunakan pada studi tugas akhir ini adalah sumber tegangan bolak balik (AC) dari PLN tiga fasa 380 Volt (fasa ke fasa) tetapi yang diambil dalam penelitian ini adalah sumber 1-fasa 220 Volt (fasa ke netral), pada frekuensi 50 Hz. Sumber PLN yang digunakan pada pengukuran ini memiliki kapasitas arus yang besar untuk dapat memperoleh nilai arus *inrush* yang tinggi. Spesifikasi sumber AC tiga fasa yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini ditunjukkan dalam tabel 3.23. Bentuk dari panel sumber yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.18.



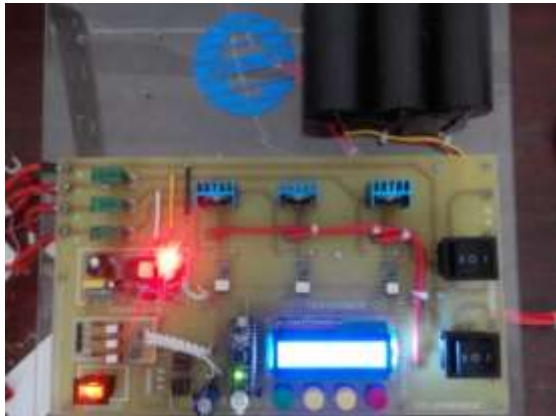
Gambar 3.18 Panel sumber 3- fasa tampak luar (a), tampak dalam (b)

Tabel 3.23 Spesifikasi sumber sistem 1-fasa di laboratorium

Spesifikasi Sumber	
V(L-N)/V(L-L)	220/380 Volt
Kapasitas arus	5 kA

3.3.1.2 *Komponen Pensaklaran*

Komponen pensaklaran digunakan untuk mendapatkan sudut tegangan agar tepat pada sudut 0° . Tegangan dengan sudut 0° akan menghasilkan nilai arus *inrush* yang maksimal. Oleh karena itu, sudut tegangan tersebut dibutuhkan untuk membuat data yang dihasilkan lebih valid. Rangkaian untuk pensaklaran dapat dilihat pada gambar 3.19.



Gambar 3.19 Rangkaian pensaklaran

3.3.1.3 *Transformator Arus*

Transformator arus digunakan dalam penelitian tugas akhir fungsinya untuk menurunkan arus yang terukur sehingga arus yang digunakan untuk pengukuran pada alat ukur DAQ 9246 tidak terlalu besar. Transformator arus yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini memiliki nilai rasio 250/5 A. Dalam pengukuran di *LabVIEW* digunakan perbandingan 250/5 A sehingga arus yang terukur di DAQ 9246 tetap dalam kondisi riilnya. Cara kerja transformator arus ini adalah dengan memanfaatkan medan yang ada di kabel yang teraliri arus dari sisi primer transformator.



Gambar 3.20 Peralatan transformator arus

3.3.1.4 Perangkat Keras Akuisisi Data dan Perangkat Lunak LabVIEW

Perangkat keras untuk akuisisi data yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah DAQ 9246 dari *National Instrument*. DAQ 9246 berfungsi untuk merekam arus yang terbangkitkan pada saat sistem menyala. Sebelum masuk ke dalam DAQ, dipasang transformator arus (*Current Transformer*) dengan rasio 250/5 sebagai proteksi untuk DAQ 9246. Rekaman yang diakuisisi oleh DAQ 9246 akan dikirim ke *personal computer* dengan perangkat lunak *LabVIEW* sebagai *human interface*-nya. Setelah proses akuisisi data selesai, dilakukan pengolahan data menggunakan perangkat lunak *DIAdem* yang merupakan sebuah fitur pengolahan data dari perangkat lunak *LabVIEW*. Bentuk dari DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 3.21 dan gambar 3.22.



Gambar 3.21 Bagian dalam DAQ 9246
(*sumber: zone.ni.com*)



Gambar 3.22 DAQ 9246 sisi depan (a), DAQ 9246 sisi belakang (b)

3.3.2 Proses Demagnetisasi

Proses demagnetisasi pada transformator adalah salah satu parameter yang dibutuhkan dalam studi ini. Bab sebelumnya membahas bahwa ketika transformator pertama kali dihubungkan ke sumber tegangan bolak - balik, menghasilkan arus magnetisasi. Arus tersebut digunakan untuk menghasilkan fluks pada inti ferromagnetik. Bila transformator di *energize* pada sudut penyalan 0° akan timbul fluks magnetisasi sebesar 2 kali lipat fluks normal yang dipengaruhi fluks sisa transformator yang tidak hilang. Setelah fluks magnetisasi mencapai saturasi menyebabkan arus *inrush* nilainya bekal lipat nilai arus nominal.

Proses demagnetisasi di sini adalah proses mengurangi fluks sisa yang ada pada inti transformator sehingga nilai arus *inrush* akan berkurang. Demagnetisasi bahan magnetik memiliki beberapa metode yaitu sebagai berikut :

1. Demagnetisasi melalui vibrasi
2. Demagnetisasi dengan pemanasan sampai suhu Curie
3. Demagnetisasi elektrik

Pada transformator hanya dapat digunakan metode demagnetisasi elektrik. Sedangkan demagnetisasi elektrik sendiri memiliki beberapa metode yaitu demagnetisasi menggunakan input sumber DC dan menggunakan kapasitor. Dalam studi ini digunakan demagnetisasi elektrik menggunakan kapasitor. Pada modul peralatan ini dipasang *shunt capacitor* yang memiliki fungsi demagnetisasi fluks yang ada di dalam transformator uji. 1 buah kapasitor 39uF seperti pada Gambar 3.23 dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh

saklar manual. Saklar dinyalakan ketika sistem tidak beroperasi, yaitu setelah proses pengukuran arus *inrush* pada transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji.



Gambar 3.23 Kapasitor demagnetisasi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL PENGUJIAN ARUS *INRUSH* DAN ANALISIS ESTIMASI FLUKS SISA

4.1 Eksperimen Arus *Inrush*

Dalam studi ini, akan dibahas tentang estimasi fluks sisa pada dua transformator 1-fasa dengan model pemotongan inti yang berbeda. Fluks sisa dapat diestimasi nilainya dengan memperhatikan nilai dari arus *inrush* pada setiap transformator 1-fasa yang diuji, dengan eksperimen pengukuran arus *inrush* secara langsung saat pengisian daya (*energize*) transformator. Arus *inrush* diukur pada sisi transformator yang bertegangan tinggi (220 V) atau sisi primer pada transformator 1-fasa yang diuji dengan keadaan transformator tanpa beban atau dalam keadaan *open circuit* pada sisi transformator bertegangan rendah (127 V). Pengukuran ini menggunakan sumber PLN 220 V yang ada pada laboratorium dengan alat pensaklaran untuk membuat sudut penyalan berada di 0° dan alat demagnetisasi untuk mengurangi fluks sisa pada inti transformator 1-fasa. Pengukuran yang dilakukan atau eksperimen arus *inrush* dilakukan di laboratorium dengan keadaan transformator tanpa beban.

4.1.1 Hasil Eksperimen Arus *Inrush* Transformator E-I

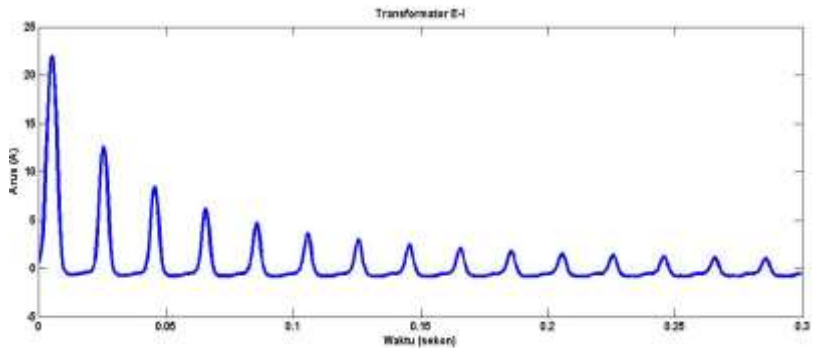
Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan pada transformator dengan model pemotongan inti normal didapatkan nilai dari arus *inrush* dan arus ketika *steady* pada sisi primer atau dalam studi ini sisi transformator yang bertegangan tinggi. Hasil eksperimen tersebut dikelompokkan ke dalam parameter waktu demagnetisasi yang telah dilakukan sebelum transformator di energisasi. Sebelum dimulai pengujian pada transformator 1-fasa dengan cara potong normal E-I untuk mendapatkan sudut penyalan 0° transformator dihubungkan ke peralatan pensaklaran dan *voltage regulator* agar tegangan sumber dapat bertahan di 220 V. Setelah itu, transformator dipasang pada modul pengujian arus *inrush* menggunakan NI 9246.

Hasil arus *inrush* yang didapatkan pada eksperimen transformator ketika belum di demagnetisasi sama sekali, memiliki nilai yang paling besar di antara eksperimen ketika sebelumnya transformator di demagnetisasi dengan waktu tertentu. Hasil eksperimen yang telah dilakukan dengan basis laboratorium pada transformator 1-fasa dengan

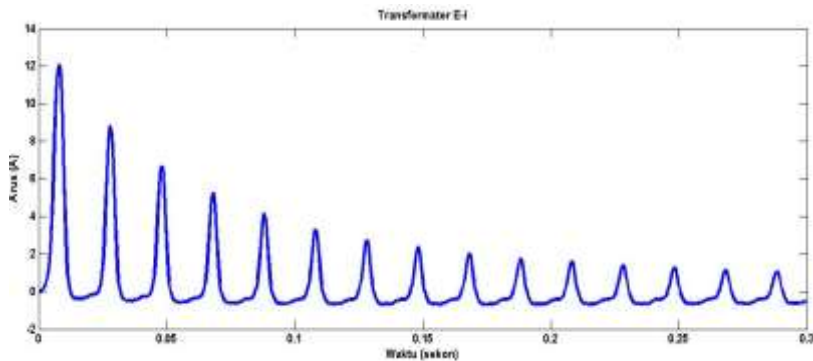
cara potong normal E-I tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.1 sampai gambar 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil eksperimen arus *inrush* pada transformator E-I

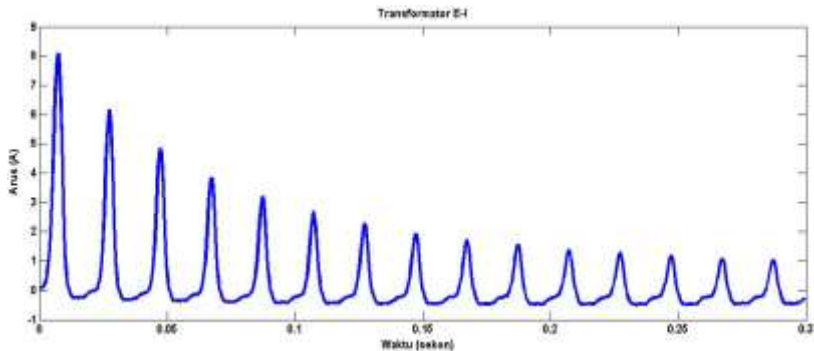
Waktu demagnetisasi	Tegangan sumber (V)	Arus nominal (A)	Arus <i>inrush</i> peak 0° (A)	Arus <i>inrush</i> rms 0° (A)
0 menit	220	4,54	22	15,5
9 menit	220	4,54	12	8,5
120 menit	220	4,54	8	5,6



Gambar 4.1 Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 0 menit



Gambar 4.2 Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 9 menit



Gambar 4.3 Bentuk gelombang arus pada transformator E-I demagnetisasi 120 menit

Hasil pada transformator E-I menunjukkan nilai arus *inrush* pada eksperimen yang dilakukan, menghasilkan nilai yang cukup tinggi pada kondisi tidak dilakukan demagnetisasi sudah mencapai nilai 22 A, ketika sudah dilakukan demagnetisasi selama 9 menit nilai arus *inrush* semakin berkurang dan ketika sudah 120 menit demagnetisasi arus *inrush* lebih berkurang lagi hingga mendekati nilai arus *inrush* ketika disimulasikan. Nilai arus *inrush* yang terukur tersebut berarti sangat dipengaruhi oleh demagnetisasi, sedangkan proses demagnetisasi sendiri adalah fungsinya untuk mengurangi jumlah fluks yang tersisa di dalam inti transformator.

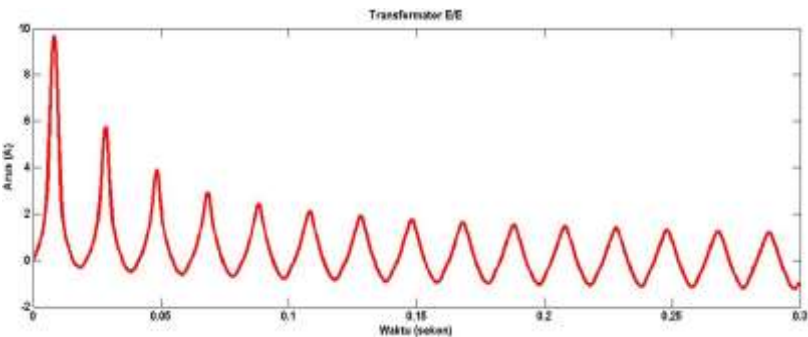
4.1.2 Hasil Eksperimen Arus *Inrush* Transformator E/E

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan pada transformator dengan model pemotongan inti modifikasi dengan pemotongan bentuk diagonal didapatkan nilai dari arus *inrush* dan arus ketika *steady* pada sisi primer atau dalam studi ini sisi transformator yang bertegangan tinggi. Hasil eksperimen tersebut dikelompokkan ke dalam parameter waktu demagnetisasi yang telah dilakukan sebelum transformator di energisasi. Sebelum dimulai pengujian pada transformator 1-fasa dengan cara potong modifikasi atau diagonal E/E untuk mendapatkan sudut penyalan 0° transformator dihubungkan ke peralatan pensaklaran dan *voltage regulator* agar tegangan sumber dapat bertahan di 220 V. Setelah itu, transformator dipasang pada modul pengujian arus *inrush* menggunakan NI 9246.

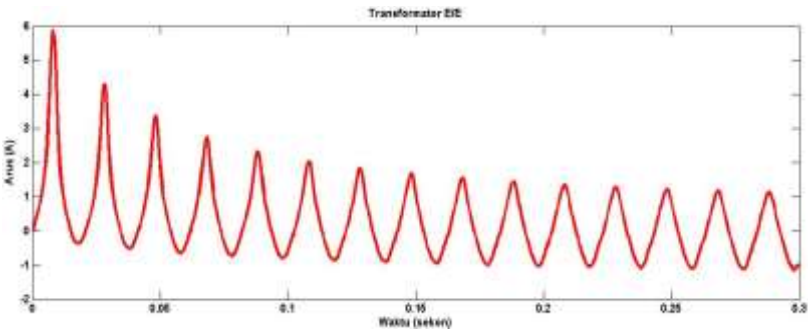
Hasil arus *inrush* yang didapatkan pada eksperimen transformator ketika belum di demagnetisasi sama sekali, memiliki nilai yang paling besar di antara eksperimen ketika sebelumnya transformator di demagnetisasi dengan waktu tertentu. Hasil eksperimen tersebut dapat dilihat di tabel 4.2 dan gambar 4.4 sampai gambar 4.6.

Tabel 4.2 Hasil eksperimen arus *inrush* pada transformator E/E

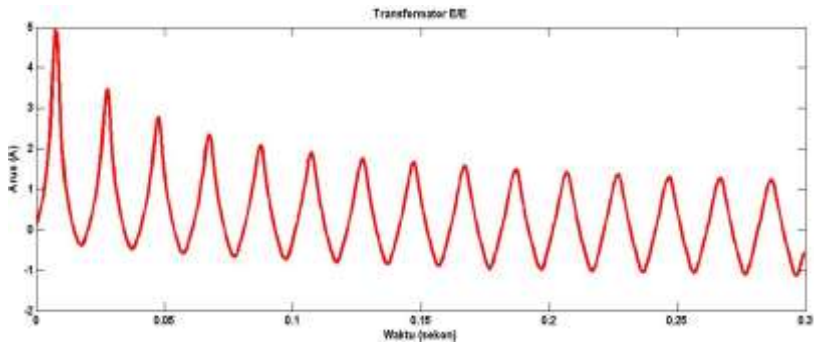
Waktu Demagnetisasi	Tegangan sumber (V)	Arus nominal (A)	Arus <i>inrush</i> peak 0° (A)	Arus <i>inrush</i> rms 0° (A)
0 menit	220	4,54	9,7	6,85
9 menit	220	4,54	5,9	4,17
120 menit	220	4,54	4,9	3,46



Gambar 4.4 Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 0 menit



Gambar 4.5 Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 9 menit



Gambar 4.6 Bentuk gelombang arus pada transformator E/E demagnetisasi 120 menit

Hasil pada transformator E/E menunjukkan nilai arus *inrush* pada eksperimen yang dilakukan, menghasilkan nilai yang tidak terlalu tinggi pada kondisi tidak dilakukan demagnetisasi dengan nilai 9,7 A, ketika sudah dilakukan demagnetisasi selama 9 menit nilai arus *inrush* semakin berkurang dan ketika sudah 120 menit demagnetisasi arus *inrush* lebih berkurang lagi hingga mendekati nilai arus *inrush* ketika disimulasikan. Tetapi pada transformator E/E pengurangan nilai arus *inrush* pada proses demagnetisasi tidak terlalu jauh karena pada nilai awal arus *inrush* tanpa demagnetisasi di transformator ini tidak terlalu tinggi. Nilai arus *inrush* tersebut berarti sangat dipengaruhi oleh demagnetisasi, sedangkan proses demagnetisasi sendiri adalah fungsinya untuk mengurangi jumlah fluks yang tersisa di dalam inti transformator.

Dari kedua hasil di atas didapatkan nilai arus *inrush* dari transformator 1-fasadengan cara potong normal E-I lebih besar nilainya dari pada nilai arus *inrush* yang ada pada transformator 1-fasa dengan cara potong modifikasi atau diagonal E/E baik dalam kondisi belum di demagnetisasi sama sekali maupun kondisi sudah di demagnetisasi selama waktu yang ada di atas. Hal ini dapat dipengaruhi dari perbedaan pemotongan inti transformator dan dapat dipengaruhi juga oleh transformator E-I yang memiliki parameter yang dapat membuat kurva magnetisasi pada transformator E/E lebih cepat mengalami saturasi daripada transformator E/E. Proses demagnetisasi pada transformator juga dapat mempengaruhi besar dan kecilnya nilai arus *inrush* pada transformator, semakin lama transformator mengalami proses demagnetisasi maka semakin banyak pengurangan fluks sisa pada

transformator sehingga mempengaruhi nilai arus *inrush* pada transformator.

4.2 Analisis Simulasi Pemodelan Dinamis Transformator 1-Fasa Dua Belitan

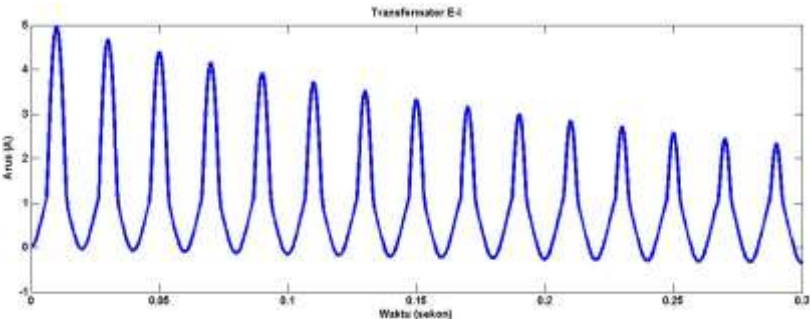
Untuk simulasi menggunakan pemodelan transformator 1-fasa dua belitan di *simulink* pada perangkat lunak MATLAB, parameter-parameter pada transformator 1-fasa, yaitu reaktansi magnetisasi (X_m), resistansi primer (R_p), resistansi sekunder (R_s), reaktansi primer (X_p) dan reaktansi sekunder (X_s) yang sebelumnya sudah didapatkan dari beberapa pengujian yang ada pada transformator dimasukkan ke dalam *script* dari MATLAB yang memodelkan transformator 1-fasa. Parameter lainnya yaitu nilai Psi (fluks) dan nilai dari delta Psi (selisih nilai fluks) yang sudah didapatkan dari simulasi MATLAB yang ada pada bab sebelumnya juga dimasukkan ke dalam *script* yang ada pada perangkat lunak MATLAB. Dari pemodelan dinamis transformator 1-fasa dua belitan ini akan didapatkan nilai dari arus *inrush* dalam keadaan transformator dengan nilai fluks sisa di dalam inti transformator sama dengan nol.

Hasil dari simulasi arus *inrush* menggunakan *simulink* untuk transformator 1-fasa dengan cara potong E-I dan transformator 1-fasa dengan cara potong E/E untuk sudut penyalan 0° ditunjukkan pada tabel 4.3 dan bentuk gelombang yang dihasilkan pada simulasi ini ditunjukkan pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.

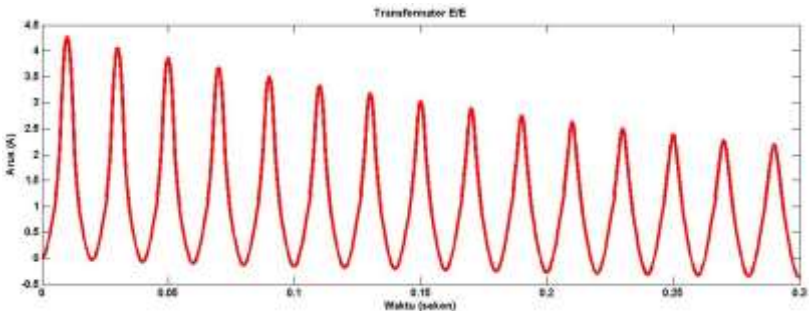
Hasil simulasi menunjukkan nilai arus *inrush* pada transformator 1-fasa E-I lebih besar dari transformator 1-fasa E/E pada saat fluks sisa kedua transformator sama dengan nol dengan transformator yang memiliki keadaan tanpa beban (*open circuit*). Transformator E-I dan E/E memiliki nilai impedansi *base* primer yang sama yaitu $48,4 \Omega$, sehingga nilai dari beban dalam keadaan *open circuit* di simulasi adalah 4840Ω . Dari hasil tersebut didapatkan nilai arus *steady* pada eksperimen dan pada simulasi nilainya hampir sama. Sedangkan bentuk gelombang pada hasil simulasi dan hasil eksperimen hampir sama sehingga dapat diasumsikan bahwa parameter yang ada di dalam simulasi sudah sesuai dengan parameter ekivalen transformator yang asli. Terlihat bentuk gelombang yang dihasilkan simulasi pemodelan dinamis transformator 1-fasa dua belitan pada transformator 1-fasa dengan cara potong E/E lebih sinusoidal dibandingkan transformator 1-fasa dengan cara potong E-I baik dipengujian maupun di simulasi.

Tabel 4.3 Hasil simulasi arus *inrush* pada kedua transformator uji

Transformer	Arus <i>inrush</i> peak (A)	Arus <i>inrush</i> rms (A)	Tegangan <i>rated</i> (V)	Beban (Ω)
E-I	5	3,5	220	4840
E/E	4,4	3,1	220	4840



Gambar 4.7 Bentuk gelombang arus hasil simulasi pada transformator E-I



Gambar 4.8 Bentuk gelombang arus hasil simulasi pada transformator E/E

4.3 Estimasi Fluks Sisa pada Transformator

Hubungan antara fluks sisa pada transformator dengan arus *inrush* dapat dilihat dari perbedaan antara hasil eksperimen dan simulasi. Fluks sisa memiliki peran besar dalam penentuan nilai arus *inrush* yang ada pada transformator. Dengan menggunakan simulasi yang memiliki *initial condition* yang sama pada setiap transformator dalam setiap pengujiannya yaitu fluks sisa sama dengan nol di dalam inti

transformator uji yang disimulasikan, maka akan didapatkan estimasi dari nilai fluks sisa yang mempengaruhi besarnya arus *inrush*. Parameter waktu digunakan untuk menentukan estimasi besarnya fluks sisa sehingga akan dapat diketahui waktu yang tepat untuk energisasi dan lama waktu demagnetisasi yang tepat untuk mengurangi nilai arus *inrush* yang ada ketika awal enegisasi transformator. Hasil estimasi fluks sisa dari transformator 1-fasa dengan cara potong E-I dan transformator 1-fasa dengan cara potong E/E yang didapatkan dari hasil simulasi dapat dilihat di tabel 4.4 dan tabel 4.5.

Tabel 4.4 Hasil eksperimen dan simulasi pada transformator E-I

Waktu demagnetisasi	Arus <i>inrush</i> peak 0° eksperimen (A)	Arus <i>inrush</i> peak simulasi (A)	Estimasi fluks sisa (Wb)
0 menit	22	5	890
9 menit	12	5	360
120 menit	8	5	155

Tabel 4.5 Hasil eksperimen dan simulasi pada transformator E/E

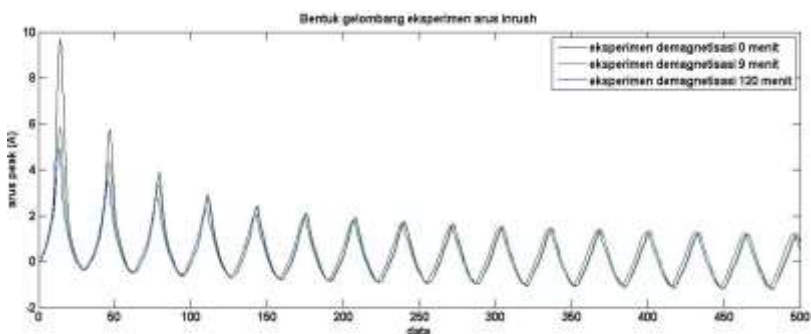
Waktu demagnetisasi	Arus <i>inrush</i> peak 0° eksperimen (A)	Arus <i>inrush</i> peak simulasi (A)	Estimasi fluks sisa (Wb)
0 menit	9,7	4,4	300
9 menit	5,9	4,4	90
120 menit	4,9	4,4	35

Tabel 4.6 Hasil estimasi fluks sisa pada kedua transformator

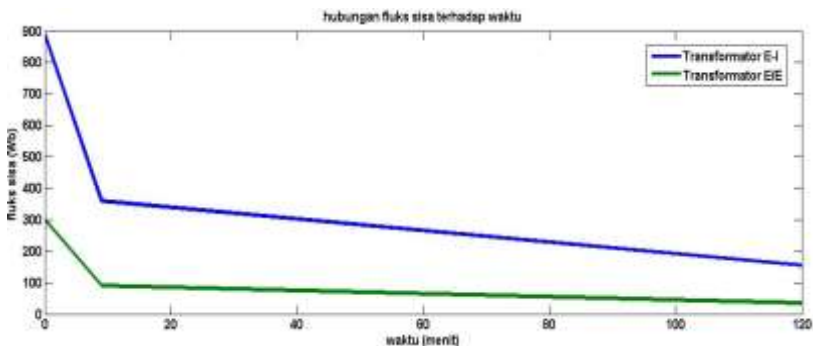
Waktu demagnetisasi	Arus <i>inrush</i> peak 0° eksperimen (A)		Arus <i>inrush</i> peak simulasi (A)		Estimasi fluks sisa (Wb)	
	E-I	E/E	E-I	E/E	E-I	E/E
0 menit	22	9,7	5	4,4	890	300
9 menit	12	5,9	5	4,4	360	90
120 menit	8	4,9	5	4,4	155	35



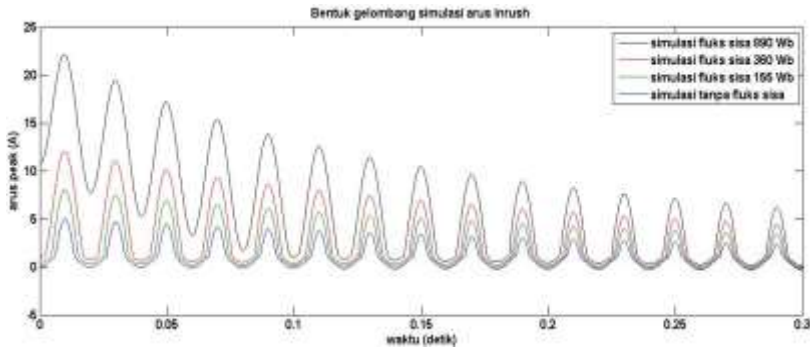
Gambar 4.9 Perbandingan bentuk gelombang eksperimen transformator E-I



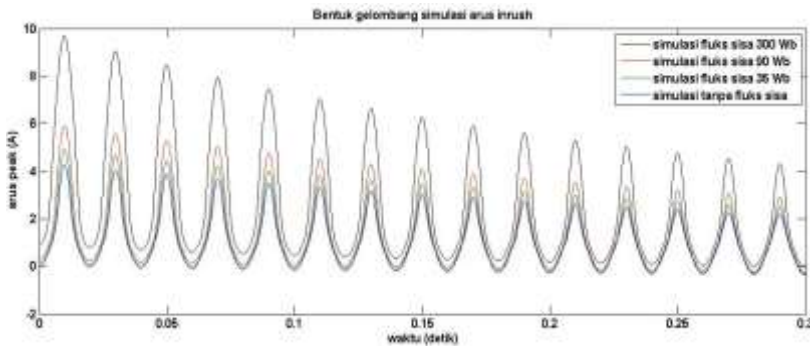
Gambar 4.10 Perbandingan bentuk gelombang eksperimen transformator E/E



Gambar 4.11 Kurva hubungan antara waktu demagnetisasi dengan fluks sisa pada kedua transformator



Gambar 4.12 Perbandingan bentuk gelombang simulasi transformator E-I



Gambar 4.13 Perbandingan bentuk gelombang simulasi transformator E/E

Nilai estimasi fluks sisa di atas adalah fluks sisa dalam keadaan transformator tanpa beban. Nilai perbandingan fluks sisa pada transformator dengan cara potong normal E-I dan transformator dengan cara potong modifikasi atau diagonal E/E ditunjukkan pada tabel 4.6. Dari hasilnya pada gambar 4.9 dan gambar 4.10 dapat terlihat semakin lama waktu demagnetisasi dari transformator maka fluks sisa di dalam transformator tersebut pun akan semakin berkurang. Hubungan antara nilai fluks sisa dengan waktu demagnetisasi ditunjukkan pada gambar 4.11.

Dari estimasi ini pun juga dapat dilihat semakin besar fluks sisa pada transformator maka arus *inrush* yang dihasilkan transformator tersebut juga akan semakin besar ditunjukkan pada gambar 4.12 dan gambar 4.13. Terlihat pada hasil yang ada di atas saat transformator 1-

fasa dengan cara potong normal E-I memiliki nilai fluks sisa lebih besar dari pada nilai fluks sisa pada transformator dengan cara potong modifikasi atau diagonal E/E baik dalam keadaan tidak didemagnetisasi maupun sudah didemagnetisasi. Fluks sisa transformator E-I saat tidak didemagnetisasi mencapai nilai 890 Wb dan saat sudah didemagnetisasi 120 menit mengalami penurunan yang signifikan mencapai 155 Wb, sedangkan untuk transformator E/E memiliki fluks sisa pada saat transformator tidak didemagnetisasi mencapai 300 Wb dan ketika sudah didemagnetisasi 120 menit turun menjadi 35 Wb. Tetapi fluks sisa tidak mempengaruhi besarnya arus *steady* transformator 1-fasa dalam keadaan transformator tanpa beban. Karena fluks sisa seperti pada penjelasan di subbab sebelumnya dapat mempengaruhi tingginya fluks magnetisasi pada proses pengisian daya (*energize*) transformator untuk pertama kalinya bukan dalam keadaan transformator sudah *steady* atau transformator sudah dalam keadaan stabil.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa fluks sisa pada transformator dipengaruhi oleh lama waktu demagnetisasi transformator yang menggunakan jenis demagnetisasi kapasitor, sehingga dengan simulasi dan parameter dari waktu demagnetisasi dapat diestimasi nilai dari fluks sisa yang ada di dalam transformator sehingga dapat ditentukan kapan waktu yang tepat untuk kembali melakukan *energize* transformator dan durasi waktu yang tepat untuk demagnetisasi sehingga menghasilkan arus *inrush* yang tidak terlalu besar. Hasil estimasi fluks sisa didapatkan transformator E-I memiliki nilai fluks sisa lebih besar dari pada nilai fluks sisa pada transformator E/E baik dalam keadaan tidak didemagnetisasi maupun sudah didemagnetisasi. Fluks sisa transformator E-I saat tidak didemagnetisasi mencapai nilai 890 Wb dan saat sudah didemagnetisasi 120 menit mencapai 155 Wb, sedangkan untuk transformator E/E memiliki fluks sisa pada saat transformator tidak didemagnetisasi mencapai 300 Wb dan ketika sudah didemagnetisasi 120 menit menjadi 35 Wb.

Sedangkan besar nilai arus *inrush* dari transformator dapat dipengaruhi oleh model pemotongan inti. Besar nilai arus *inrush* pada transformator E-I saat simulasi sebesar 5 A sedangkan saat eksperimen langsung nilainya 22 A ketika transformator tidak didemagnetisasi sama sekali. Untuk transformator E/E nilai arus *inrush* saat simulasi sebesar 4,4 A sedangkan saat eksperimen langsung nilainya 9,7 A ketika transformator tidak didemagnetisasi sama sekali. Transformator E-I yang intinya menggunakan pemotongan normal memiliki nilai arus *inrush* yang lebih besar dari pada transformator E/E yang intinya menggunakan pemotongan modifikasi yaitu diagonal. Hal ini dipengaruhi oleh parameter pada transformator E-I memiliki kurva magnetisasi yang lebih cepat saturasi dari pada transformator E/E sehingga dapat mempengaruhi besar arus *inrush*. Selain dari pengaruh fluks sisa yang ada pada inti transformator 1-fasa, kondisi saturasi atau titik saturasi pada inti transformator 1-fasa juga mempengaruhi besar dari nilai arus *inrush* transformator.

5.2 Saran

Saran yang dianjurkan untuk penelitian berikutnya yaitu perlu digunakan alat pengukur besarnya nilai fluks yang dapat mendapatkan data riil dan *real time*. Dari nilai fluks yang dapat terukur tersebut dapat diestimasi besarnya nilai arus *inrush* dari suatu transformator yang diuji. Sehingga penelitian berikutnya bila menggunakan metode lain dalam estimasi fluks sisa hasilnya dapat divalidasi dengan keadaan transformator sebenarnya, sehingga hasil lebih valid.

Metode demagnetisasi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini hanya menggunakan kapasitor. Untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk pengembangan teknologi demagnetisasi dengan metode lainnya yang lebih baik lagi dalam pengurangan fluks sisa transformator sehingga besarnya arus *inrush* dapat diperkecil nilainya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen. J. “*Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*,” McGraw-Hill Education, New York, 2005.
- [2] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing inrush current in transformers. I. Numerical simulation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 1, pp. 246-254, Jan. 1993.
- [3] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing inrush current in transformers. II. Harmonic analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 1, pp. 255-263, Jan. 1993.
- [4] Paul C., Y. Ling and Amitava Basak, “Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer,” *IEEE Transactions On Magnetics*. vol. 24, no. 6, November 1988.
- [5] D.Cavallera, V. Oiring, J. L. Coulomb, O. Chadebec, B. Caillault, and F. Zgainski, “A New Method to Evaluate Residual Flux Thanks to Leakage Flux, Application to a Transformer,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, Feb 2014.
- [6] Puneet Kumar Singh , D K Chaturvedi, “Modeling and Simulation of Single-Phase Transformer Inrush Current using Neural Network,” *National Conference on Emerging Trends in Electrical, Instrumentation & Communication Engineering.*, vol.3, no.2, 2.
- [7] Rizqy Alif Sandeputra, I Made Yulistya Negara, dan Arif Musthofa. “Pengaruh Fluks Sisa Pada Transformator 1-Fasa Terhadap Arus Inrush”, *JURNAL TEKNIK ITS*, Vol. 4, No. 1, Surabaya. 2016.
- [8] Chee-Mun Ong, “*Dynamic Simulation of Electrical Machinery Using MATLAB™/SIMULINK*,” Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998
- [9] R. Yacamini and A. Abu-Nasser, “Numerical calculation of inrush current in single phase transformers,” *IEE Proc. B, Electr. Power Appl.*, vol. 128, no. 6, pp. 327–334, Nov. 1998.
- [10] Y. Corrodi, K. Kamei, H. Koyama, H. Ito, and T. Goda, “Influence of system transients on the residual flux of an unloaded transformer,” in *Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, Jul. 2011, pp. 1–7.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Ayub Dhimastara Aji, lahir di Kota Jakarta, 14 Maret 1995. Biasa dipanggil Ayyub. Penulis berdomisili di Jakarta. Riwayat pendidikan penulis dimulai di SDIT Taufiqurrahman, lulus pada tahun 2007. Kemudian lulus dari SMP Negeri 236 Jakarta pada tahun 2010 dan lulus dari SMA Negeri 68 Jakarta pada tahun 2013. Lalu pendidikan tinggi dilanjut ke jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Elektro, Departemen Teknik Elektro pada tahun 2013. Bidang Studi

Teknik Sistem Tenaga diambil selama masa perkuliahan di Teknik Elektro ITS. Selama kuliah penulis pernah berkecimpung di berbagai dunia manajerial dan organisasi menjadi Kepala Biro Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS pada periode 2015-2016. Pemandu Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa ITS. Dan sekarang penulis sedang diamanahi menjadi Wakil Ketua Badan Koordinasi Pemandu ITS periode 2016-2017, sekaligus menjadi Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email penulis sebagai berikut ayyub.dhimastara@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan